

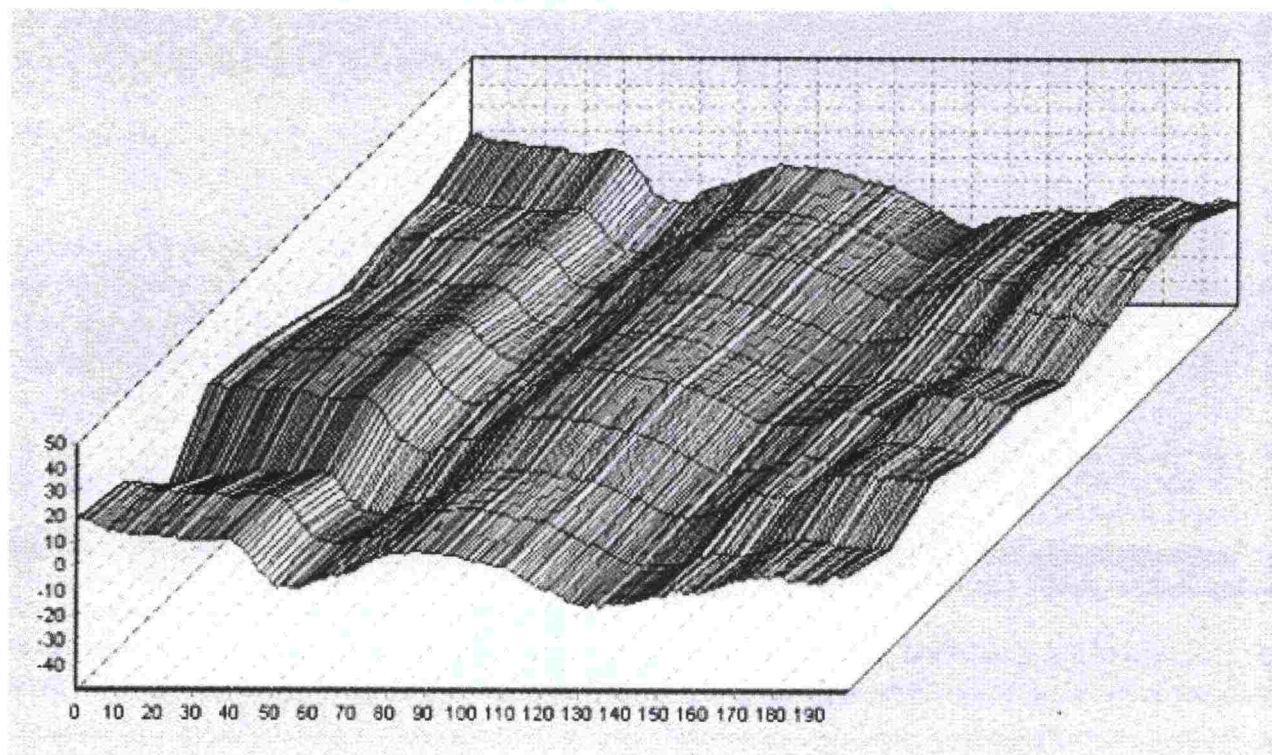
Rainer Laaksonen, Harri Kivikoski, Markku Pienimäki, Leena Korkiala-Tanttu ja Jouko Törnqvist

Deformaation hallinta tien rakennekerroksissa

Deformaation laskentatyökalun kehittäminen

14.12.2004

Tiehallinnon selvityksiä 57/2004



Rainer Laaksonen, Harri Kivikoski, Markku Pienimäki, Leena Korkiala-Tanttu ja Jouko Törnqvist

Deformaation hallinta tien rakennekerroksissa

Deformaation laskentatyökalun kehittäminen

Tiehallinnon selvityksiä 57/2004

Tiehallinto
Helsinki 2004

PTM2000 autolla mitattu tien pinnan 3D –uramalli.

Verkkoversio (www.tiehallinto.fi/julkaisut) pdf
ISSN 1459-1553
ISBN 951-803-392-7
TIEH 3200907-v

Helsinki 2004

Julkaisua saatavana:
www.tiehallinto.fi/julkaisut

Tiehallinto
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihde 0204 2211

Rainer Laaksonen, Harri Kivikoski, Markku Pienimäki, Leena Korkiala-Tanttu ja Jouko Törnqvist: Deformaation hallinta tien rakennekerroksissa, Deformaation laskentatyökalun kehittäminen. Helsinki 2004. Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 57/2004. 63 s. + liitt. 34 s. ISSN 1459-1553, ISBN 951-803-392-7, TIEH 3200907-v.

Asiasanat: tierakenne, deformaatio, urautuminen, kosteus, jäykkyys, laskentaohjelma
Aiheluokka: 32

TIIVISTELMÄ

Tässä tutkimuksessa on kehitetty menettely, jolla urakoitsijat ja materiaalitoimittajat voivat hallita, mitoittaa ja mitata, deformaatiota osana toimivuusvaatimus pohjaista hankintamenettelyä.

Tutkimus on osa Tiehallinnon hankintamenettelyjen kehittämismenettelyjä. Tutkimus on keskittynyt kehittämään menetelmät ja mittauslaitteet tierakenteen eri kerrosten deformaation mittaamiseen sekä luomaan työkalun tierakenteen kerroskohtaisen ja kokonaisdeformaation laskemiseksi. Tutkimus keskittyi lähinnä sitomattomien materiaalien deformaation hallintaan – joskin menettely ja työkalu on avoin materiaalien osalta.

Tutkimus käsittää kolme erillistutkimusta. Ensimmäinen tutkimus käsitteli deformaation mittausmenetelmiä, toinen määrittä lämpötilan vaikutusta asfalttipäällysteisten teiden deformaatioon ja kolmas keskittyi luomaan yleisen laskentamenettelyn rakenteellisen deformaation ennustamiseksi rakenteen suunnitteluvaiheessa.

Mittausmenetelmätutkimuksessa kehitettiin, kokeiltiin ja kuvattiin tierakenteen deformaation mittausmenetelmät. Hankkeen yhteydessä mitattiin kohde Soinissa Länsi-Suomessa. Kehitetyt mittausmenetelmät soveltuvat uudisrakennuskohteisiin ja kohteisiin, jossa käytetään asemasekoitteisia massoja. Menetelmät eivät sellaisinaan sovi paikalla sekoitusjyrsittäviin ja stabiloitaviin kohteisiin.

Toisessa tutkimusosassa selvitettiin Kehä III:lla tehdyin mittauksin erilaisten päällyste – kantavakerros -rakenteiden deformatumista kesän 2002 hellepäivien johdosta. Mitatut deformaatiot asettuivat odotusten mukaiseen järjestykseen, vaikkakin jäykimmillä rakenteilla deformaatiota ei tapahtunut mitattavissa määrin.

Kolmannessa tutkimusosiossa kehitettiin yleinen kehys sekä prototyyppi-versio tierakenteen deformaation laskennalliseen arviointiin. Tutkimuksessa kuvattiin muuttujat, jotka vaikuttavat rakenteen deformatumiseen, tehtiin materiaalikokeita tyypillisillä rakennekerrosmateriaaleille, luotiin materiaaleille yksinkertaistetut deformaatiomallit ja deformaation laskentatyökalu. Työkalu on myöhemmin laajennettavissa sekä ratkaisumenetelmiltään että materiaali valikoimaltaan. Käyttäjä, mm. urakoitsijat ja konsultit, voivat tulevaisuudessa tuottaa itse omia materiaalimallejaan laskentamenettelyyn. Deformaatioon vaikuttavista tekijöistä tehty kirjallisuusselvitys on liitetty raportin liitteeksi (liite 1).

Tutkimuksen käynnistäjä oli Tiehallinto. Tutkimus on toteutettu Infra teknologiaohjelmaan kuuluneena Tekes –projektina, jota rahoittivat Tiehallinnon lisäksi Lemminkäinen Oyj, Skanska Tekra Oy, Tieliikelaitos, Lohja Rudus Oy ja Helsingin kaupungin Rakennusvirasto ja Asfalttiliitto ry.

Rainer Laaksonen, Harri Kivikoski, Markku Pienimäki, Leena Korkiala-Tanttu and Jouko Törnqvist: *Deformaation hallinta tien rakennekerroksissa, Deformaation laskentatyökalun kehittäminen*. [Decreasing the rutting by development of road structure. Development of calculation tool for rutting] Helsinki 2004. Finnish Road Administration. Finnra Reports 57/2004. 63 p. + app. 34 s.. ISSN 1459-1553, ISBN 951-803-392-7, TIEH 3200907-v.

Keywords: road structure, permanent deformation, rutting, permanent deformation, moisture, stiffness, design program

SUMMARY

A technology for controlling, measuring and designing against road rutting due to deformation has been developed in this study. It allows contractors and material suppliers to deal with deformation as a part of performance based procurement practice.

This study belongs to the development process of procurement practice of the Finnish Road Administration. The focus of this study has been both in developing measurement methods and measuring apparatus for determining the deformation in various layers of a road structure and developing a tool for calculation of deformation in various layers together with the total deformation. Mainly unbound materials and layers were dealt with but the procedure and calculation tool is open for all materials.

Three separate investigations were a part of this study. The first one dealt with deformation measuring methods, while the second one measured the effect of temperature on the deformation of asphalt pavements. The third study developed a calculation method for deformation estimation in the structural design phase.

During the measurement methodology phase the methods were built up, tested and described. One site, Soini in Western Finland, was instrumented and measured during the project. The methods developed are suitable for new construction and for places where layer material is produced with a central mixer. In the current form they are not suitable for structures where in situ stabilisation takes place.

In the second task the total deformation of different pairs of pavement base course of Kehä III were measured during summer 2002 to study the effect of hot days. The measured deformations were found to comply with the expectations, although the stiffer structures were not deforming.

In the third phase a general framework and a prototype tool were developed for deformation estimation of road structure. The variables affecting to deformation were described, tests were done with typical road structure materials, simplified models for various materials and a calculation tool were developed. The calculation tool is open to later enlargements of both material selection and solution method. The end users, contractors and consultants, are able to produce their own material models for the calculation process.

The study was launched by the Finnish Road Administration. It has been carried out under the INFRA Technology programme of the National Technology Agency of Finland, and it was also financed by the Finnish Road Administration, Lemminkäinen Oyj, Skanska Tekra Oy, Finnish Road Enterprise, Lohja Rudus Oy, the City of Helsinki and the Finnish Asphalt Association.

ESIPUHE

'Deformaation vähentäminen tien päällysrakenteita kehittämällä' on osa Tiehallinnon hankintamenettelyjen kehittämistä. Tutkimus keskittyy selvittämään syyt tierakenteen deformatumiseen, luomaan tarvittavat mittausmenetelmät ja kehittämään deformaation laskemiseen tarvittavan työkalun. Rahoittajina tutkimuksessa olivat Tekes, Tiehallinto, Lemminkäinen Oyj, Tieliikelaitos, Skanska Tekra Oy, Lohja Rudus Oy, Helsingin kaupunki (HKR) ja Asfalttiliitto ry. Tutkimus tehtiin VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa laaditun tutkimussuunnitelman mukaisesti sekä Tekes –projektin johtoryhmän ohjauksessa.

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää:

- Mittausmenetelmät deformaation paikan ja määrän mittaamiseen maastossa
- Deformaatio-ominaisuuksien määrittäminen menetelmät laboratoriossa ja deformaatio-ominaisuudet tyyppimateriaaleille
- Laskentatyökalu, jolla voidaan laskearakeenteeseen syntyvä deformaatio ja, jolla voidaan vertailla ja optimoida rakenteita

Tutkimuksen aikana ohjausryhmä päätti työn ohjauksesta ja osittaisesta uudelleensuuntauksesta. Ohjausryhmän jäsenille tiedotettiin työn edistymisestä ja he osallistuivat raportin kommentointiin. Tutkimuksen ohjausryhmään kuuluivat:

Heikki Jämsä	Asfalttiliitto ry (pj)	Pertti Heininen	Skanska Tekra Oy
Tom Warras	Tekes	Hanna Järvenpää	Lohja Rudus Oy
Kari Lehtonen	Tiehallinto	Pekka Isoniemi	HKR
Vesa Laitinen	Lemminkäinen Oyj	Pertti Peltomaa	NCC Roads Oy
Raimo Ledentsä	Tieliikelaitos	Seppo Kauppinen	Valtatie Oy

Tutkimus on tehty VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa. Rainer Laaksonen sekä Jouko Törnqvist olivat vastuussa tutkimuksen valmistelusta. Mittausmenetelmien kehittämisestä ja kenttäkokeista vastasi Harri Kivikoski. Deformaatiomallien kehittämisestä ja laskentatyökalun kehittämisestä vastasivat Rainer Laaksonen ja Markku Pienimäki. Laboratoriokokeista vastasi Rainer Laaksonen. Kirjallisuusselvityksen laati Leena Korkiala-Tanttu. Asfalttipäällysteiden deformaatiomääritykset teki Teknillisen Korkeakoulun Tielaboratorio. Raportin laadinnasta, koetulosten käsittelystä ja osatehtävien kokoamisesta vastasivat Rainer Laaksonen, Harri Kivikoski, Markku Pienimäki, Leena Korkiala-Tanttu sekä Jouko Törnqvist.

Espoossa elokuussa 2004

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Tiehallinto

MERKINNÄT

Tässä työssä käytetyt merkinnät ja käsitteet on määritetty alla.

Merkintä / Käsite	Selite
p	$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, hydrostaattinen jännitys, (pääjännitysten keskiarvo) [kPa]
q	$q = \sigma_1 - \sigma_3$, deviatoorinen jännitys (leikkausjännitys, pääjännitysten σ_1 ja σ_3 erotus) [kPa]
a	Attraktio, jännitysakselin (σ tai p) ja murtosuoran leikkauspiste, a :lla sama arvo molemmissa akselistoissa
σ	Jännitys [kPa]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Pääjännitykset [kPa]
τ	Leikkausjännitys [kPa]
ε_1^p	Pysyvä pystysuuntainen muodonmuutos [-] tai [%]
A, B	Potenssifunktion kerroin ja eksponentti [-]/[-]
N	Syklien määrä [kp]
S, S_m	Mobilisoitunut lujuus [%]. p - q -koordinaatistossa olevan jännityspisteen ja attraktio -pisteen ($a, 0$) -kautta kulkevan suoran kaltevuuden suhde murtosuoran kaltevuuteen.
deformaatio	Deformaatio tarkoittaa tässä työssä rakennekerroksen (pystysuuntaista) muodonmuutosta [%]
alku-ura	Ura, joka muodostuu valmiin päällysteen pintaan noin 4-6 viikon sisällä liikenteelle otosta.
ura, kokonaisura	Ura, joka johtuu kulumasta, päällysteen deformaatiosta ja alempien rakennekerrosten sekä pohjamaan deformaatiosta
kuluma	Nastarengaskuluma, kulumanopeus on likimäärin vakio
urautuminen	Nastarengaskuluman ja deformaatioiden summa. Urautuminen kiihtyy vakiona pysyvällä kuluma-arvolla, koska liikenne keskittyy uriin.
jälkitiivistyminen	Rakenteen rakennusaikaisen tiivistämisen jälkeinen ajoneuvo-kuormien aiheuttama tiivistyminen.
aksiaalinen	Aksiaalinen tarkoittaa tässä pystysuoraa suuntaa
deviatoorinen	Deviatoorinen = leikkausjännitys
KVL	Keskivuorokausiliikenne [kp]
HVS	Heavy Vehicle Simulator, koetiekone
mobilisaatioaste	Mobilisaatioaste tarkoittaa tarkasteltavan jännityspisteen ja attraktio -pisteen (a) kautta kulkevan suoran kaltevuutta murtosuoran kaltevuuteen. Määrittystapa vaihtelee eri lähteissä.
$1/F$ tai S_m	

Sisältö

1	JOHDANTO	8
1.1	Tutkimuksen tausta	8
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	8
1.3	Tutkimuksen tuloksen hyödyntämismahdollisuudet	9
2	DEFORMAATION MÄÄRITELMÄ	15
2.1	Deformaation muodostuminen	15
2.2	Deformaatioon vaikuttavat tekijät	18
2.3	Deformaatiota vähentävät tekijät	20
2.4	Deformaatiolaskentamallin periaate	21
3	LABORATORIOKOKKEET	24
3.1	Sykliset kuormituskokeet	24
3.2	Deformaation määrittäminen laboratoriokokein	28
4	MATERIAALIKOKEIDEN TULOKSET	30
4.1	Luokitusominaisuudet	30
4.2	Pysyvät muodonmuutokset	31
4.3	Jäykkyys ja Poisson -luku	35
4.4	ICT -kokeet	37
5	LASKENTATYÖKALU	38
5.1	Deformaation laskennan nykytilanne	38
5.2	Laskennan periaate ja lohko-kaavio	38
5.3	Työkalun ominaisuudet	40
5.4	Työkalun lähtötietovaatimukset	43
5.5	Vaihtoehtoiset ratkaisumenetelmät	45
5.6	Laskentatyökalun ensimmäinen versio	48
5.7	Periodijako- ja parametriarvosuositus	49
5.8	Laskentatyökalun käyttöympäristö	50
5.9	Esimerkkilaskelmat	50
5.10	Laskentatyökalun toiminnan varmentaminen	56
5.11	Laskentatyökalun kehitysmahdollisuudet	56
6	YHTEENVETO	58
7	JATKOTUTKIMUSTARPEET	60
8	KIRJALLISUUS	61
9	LIITTEET	63

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Viime vuosien kehityksen vaikutuksesta päällysteiden kulumiskestävyysongelma on vähentynyt (kestävämmät päällysteet ja renkaiden nastojen kehittyminen vähemmän kuluttavaan suuntaan). Samaan aikaan ovat kuorma-autoissa yleistyneet ns. supersinglepyörät, joiden kuormitusvaikutus on jopa 3-4 kertainen verrattuna perinteisiin paripyöriin. Tämän kehityksen vaikutuksesta tierakenteiden ja päällysteiden deformaatiokestävyyden merkitys on suhteellisesti ja absoluuttisesti kasvanut kaikilla teillä ja kaduilla.

Deformaatiolla tässä tutkimuksessa tarkoitetaan sellaista tien rakenteeseen syntyvää pysyvää muodonmuutosta, joka ilmenee mm. tien pinnan urautumisena, mutta joka ei ole tien pinnan kulumisesta johtuvaa.

Satamalaitoksilla, teollisuuslaitoksilla ym. on runsaasti sellaisia kohteita, joissa rakenteelle ja päällysteelle asetetaan erittäin suuria vaatimuksia muodonmuutoskestävyydelle.

Jatkossa uusien tai peruskorjattavien teiden ja katujen hankinnoissa on pyrittävä valitsemaan sellaiset rakenneratkaisut, jotka vähentävät deformaation muodostumista. Tämä edellyttää tietoa siitä, missä päällysrakenteen osassa deformaatiota tapahtuu. Tieto deformaation syntymekanismista ja paikasta rakenteessa vaikuttaa myös verkkotason ylläpito- ja kunnostustoimenpiteiden suunnitteluun.

Tässä tutkimuksessa on keskitytty käsittelemään sitomattomissa kerroksissa syntyvää deformaatiota dynaamisesti ajoneuvokuormitetussa tie- tai katurakenteessa. Kehitetty mitoitusmenettely on kuitenkin avoin kaikille rakenteen materiaalin tavoin käyttäytyville materiaaleille.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Projektiin osallistui useita eri tahoja, joilla on osittain myös erilaisia tavoitteita. Yhteinen tavoite kaikille oli hankintamenettelyjen ja siihen liittyvien materiaalien- tai rakenteiden hyväksymis- menettelyjen, laatumittareiden ja deformaation mittausten kehittämisen. Tiehallinnon näkökulmasta tärkeää on erityisesti raskaasti liikennöityjen teiden rakenteiden kehittäminen. Kaupungeilla ja kunnilla suurimmat ongelma-alueet ovat valo-ohjattujen risteysten alueet, linja-autokaistat ja pysäkit sekä terminaalit. Erityisvaatimuksia aiheuttaa lisäksi lämmitettyjen sidottujen kerrosten käyttö. Satamalaitoksille ongelmallisia ovat varikkoalueet, joilla kuormitukset ovat suuria, staattisia ja pistemäisiä sekä liikenne raskasta ja kanavoitua.

Tutkimuksen tavoitteet on hankintamenettelyä palvellen jaettu seuraavasti:

- Mittaus- ja todentamismenetelmien kehittäminen. Kehitetään tätä tutkimusta ja kokonaisvastuu-urakoita varten mittautapa, jolla voidaan määrittää, mikä osa deformaatiosta tapahtuu päällysteessä, mikä osa sitomattomissa kerroksissa ja mikä pohjamaassa eri tilanteissa.
- Materiaalien laatuluokittelun ja testausmenetelmien valinta ja verifiointi. Määritetään tuotteiden testausmenetelmät ja laatuksiteerit, joiden avulla tuottaja voi osoittaa tuotteittensa toiminnallisen laadun deformaatiokestävyyden osalta.
- Rakenteiden käyttäytymisen mallintaminen – mitoitus deformaatiota vastaan. Kehitetään nykyisten laboratoriomenetelmien rinnalle laskentamenetelmät, joilla päällysteen tuottaja tai maarakentaja voi osoittaa tuotteensa vaikutuksen päällysteen ja muiden rakennekerrosten deformaatioitumiseen ja joihin tukeutuen rakennuttaja voi muodostaa toiminnalliset laatuvaatimukset (lähtökohdat tuotekehitykselle ja mitoitukselle).
- Tulevien hyväksyttämismenettelyjen edellyttämien mittaus- ja mitoitusvalmiuksien luominen. Mallien luotettavuuden todentaminen koekohteilla useamman vuoden koejakson puitteissa. Järjestetään urakoitsijoille mahdollisuus omien tuotteittensa testaamiseen koekohteilla.

Edellisen listan tavoitteista ensimmäistä on käsitelty tutkimuksen osassa 1. Kyseinen osa (Osa 1: Deformaation mittausmenetelmät) on julkaistu erillisenä työraporttina. Erillisenä työraporttina on edelleen esitetty tutkimukseen sisällytetty erillisselvitys (Osa 2: Asfalttipäällysteiden deformaatioituminen), joka kesän 2002 mittautulosten perusteella pyrki luomaan enustemallin hellepäivien lukumäärän, päällysteen lämpötilan ja päällysteen deformaationopeuden välille.

Tässä osassa (Osa 3: Deformaation laskentatyökalun kehittäminen), esitetään laskentatyökalun kehitysversio. Tässä vaiheessa on pitäydytty deformaation laskentaan perinteiselle tierakenteelle. Työkalulla ei tässä vaiheessa voida käsitellä stabiloituja rakenne- tai pohjamaakerroksia taikka hyödyntää teräsverkkojen tai lujitteiden vaikutusta deformaation vähentämisessä. Myöskään jäätymisen tai roudan rakennetta löyhdyttävää vaikutusta ei työkalulla voida vielä simuloida. Päällysteen (kulutus- ja sidekerroksen) deformaatioitumista ei myöskään vielä voida työkalulla laskea.

Deformaatio lasketaan käyttäen kuormana standardiakselia. Kuormituksen sitomattomiin kerroksiin ja pohjamaahan aiheuttamat jännitykset vaihtelevat laajasti eri kerrosten jäykkyyksien ja kerrospaksuuksien mukaan.

1.3 Tutkimuksen tuloksen hyödyntämismahdollisuudet

Tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää kun tienpinnan urautumista käytetään tien toimivuusominaisuutena. Toimivuusvaatimuksella tarkoitetaan

tässä yhteydessä tuotteelta tai palvelulta vaadittua ominaisuutta, joka esitetään erittelemättä sen saavuttamiseen tarvittavaa teknistä ratkaisua.

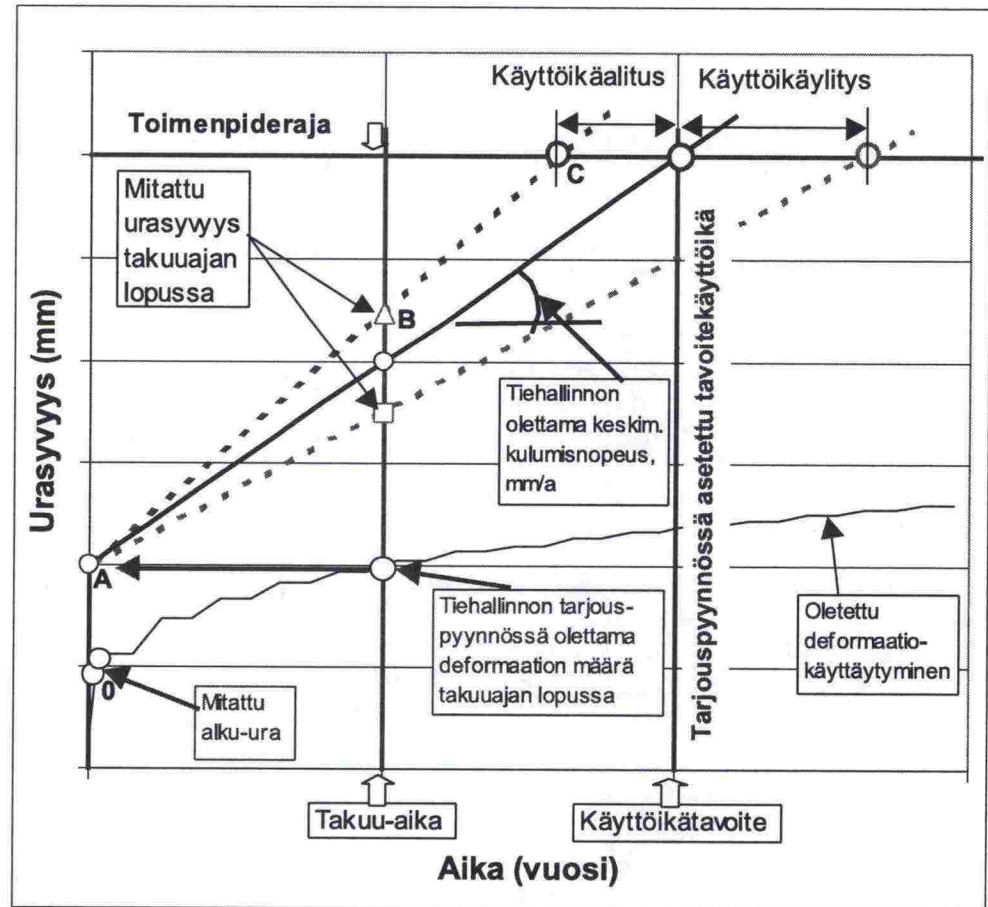
Tiehallinto siirtyy toimivuusvaatimuksiin SR –urakoissa (suunnittele–rakenna –urakka) myös deformaation osalta. Sen sijaan, että Tiehallinto määrittelisi materiaalit, mitoituksen ja tiivistyksen, annetaan urakoitsijalle vapaammat mahdollisuudet valita materiaalit, mitoitusmenettely ja tuotantotekniikka. Osittainen vastuujako ei deformaation osalta toimi, koska urautuminen riippuu kaikista kolmesta tekijästä. Deformaation kehittymisnopeus on myös todettavissa jo takuuajan mittauksin. Uusi vastuunjako helpottaa urakoitsijan materiaaleihin, rakenteisiin ja tuotantotekniikkaan kohdistuvia tutkimus- ja kehityshankkeita.

Tiehallinnon hahmottelema yksinkertaistettu takuuajan todentamismenetely voisi olla seuraavanlainen (kuvat 1.1 - 1.2):

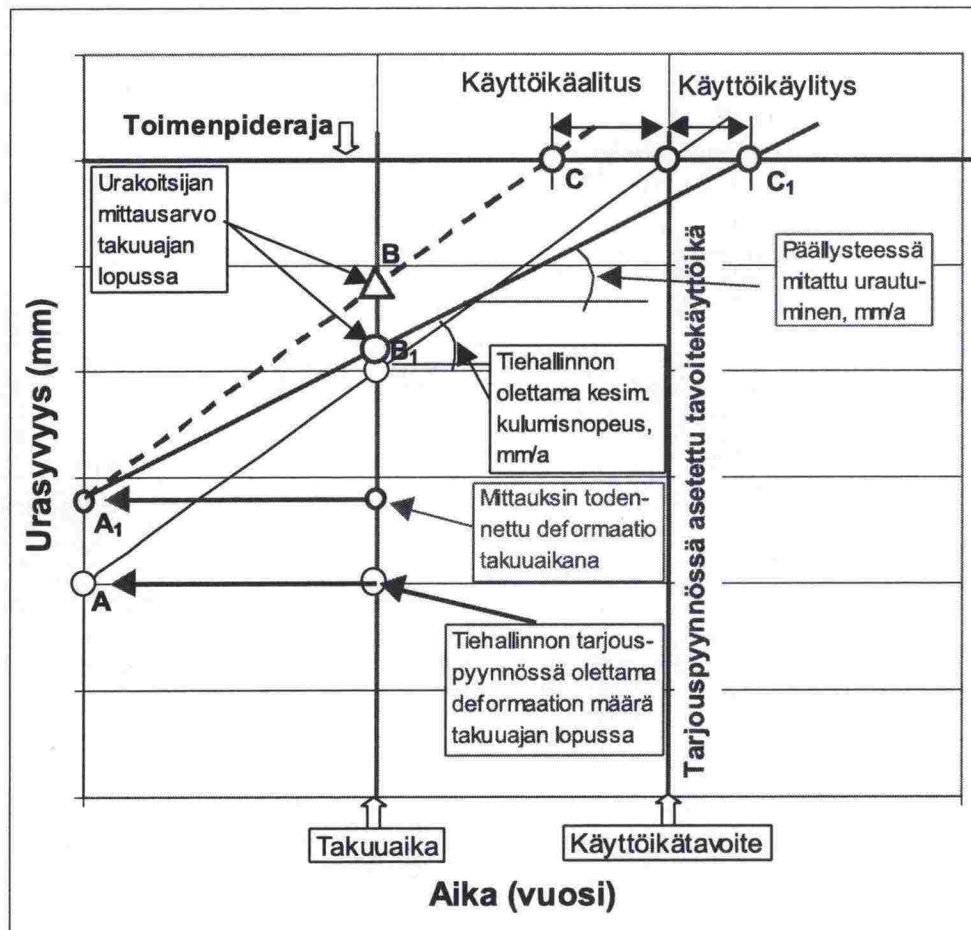
- Deformaation määräksi takuuajan lopussa oletetaan uudella tiellä esimerkiksi 2 – 6 mm, vaiheittainrakentamisen jälkeen yhteensä 2 – 4 mm kolmen seuraavan vuoden aikana ja myöhemmän uudelleenpäällystyksen jälkeen 1 – 3 mm. Nämä arvot tarkentuvat myöhemmin, koska deformaation määrää ei ole riittävästi selvitetty tähän mennessä.
- Mitataan kokonaisuus alussa ja takuuajan lopussa erottelematta kulumaa ja deformaatiota.
- Päällysteen käyttöikä ennustetaan kuvan 1.1 mukaisella käyttöiän ekstrapolointimenettelyllä. Tavoitekäyttöikään voi päästä myös vaikka deformaatorasyvyys on oletettua suurempi, jos keskimääräinen vuosittainen kuluminen on vastaavasti hitaampaa (kuva 1.2).
- Päällystysurakoitsija voi osoittaa mittauksin deformaation osuuden suuremmaksi ja lieventää näin arvovähennyksiä tai jakaa vastuuta edelleen. Tiehallinto soveltanee menettelyä, jossa kuluma on päällystysurakoitsijalle kalliimpaa kuin deformaatioura.

Urakoitsija voi myös hyödyntää vaiheittainrakentamismenettelyä urautumisen hallinnassa (kuva 1.3). Vaiheittainrakentaminen nollaa uran uudelleenpäällystyksen yhteydessä ja myös IRI –arvo paranee takuuajan lopussa. Tiehallinto voi kuitenkin rajoittaa vaiheittainrakentamista väsymiskestävyyden varmistamiseksi. Vaiheittainrakentamisen yleistyessä tavoitekäyttöikää mahdollisesti myös nostetaan.

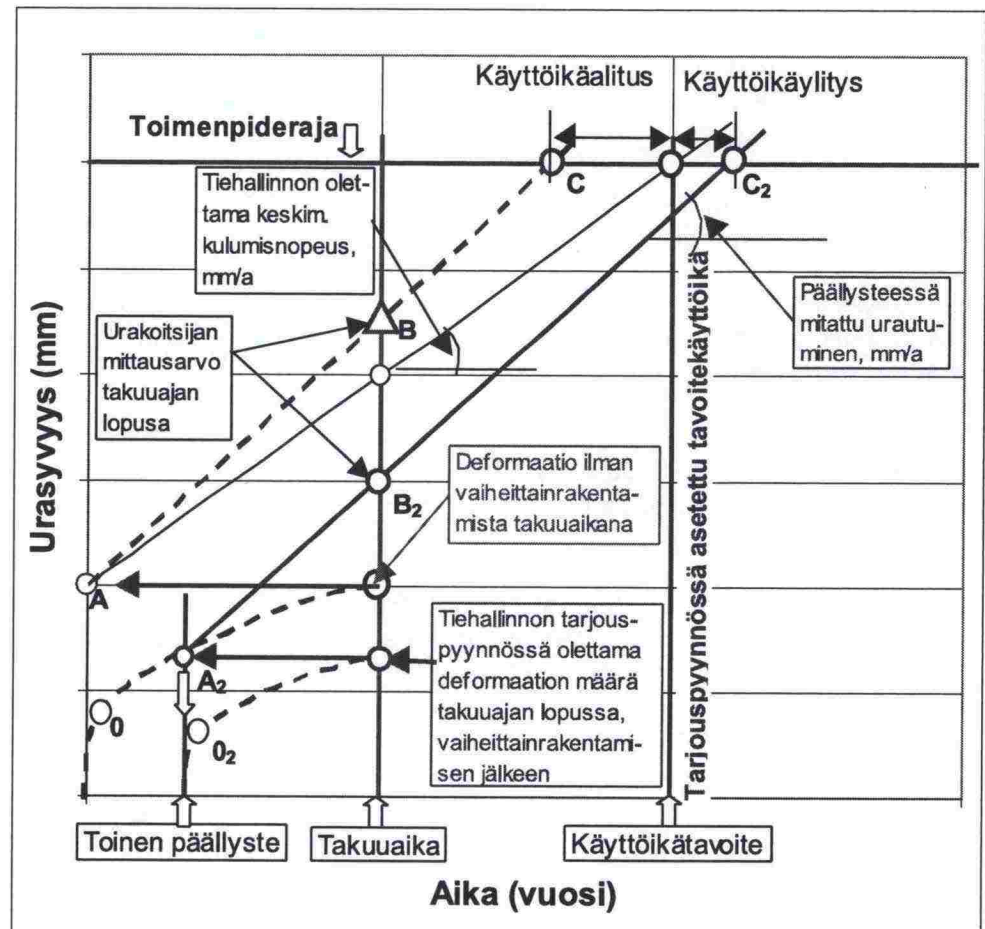
Urakoitsijan etu on siis tietää ja lisäksi kyetä osoittamaan deformaation määrä. Tämä voidaan tehdä esim. mittaamalla nastarengaskulumaa takuuajan talvikausina (kevät - syksy –mittaukset, kuva 1.2). Tällöin päällysteen kulumisen ja deformaation aiheuttama urautumisnopeus ja päällysteen alapuolisten kerrosten deformaation määrä on määritettävissä takuuajan lopulla, jolloin takuuajan laatumittaukset tehdään.



Kuva 1.1. Päällysteen urautumiskäyttöiän ennustaminen Tiehallinnon antaman deformaatioarvon ja takuuajan lopun uramittausten pohjalta. Piste A esittää Tiehallinnon oletamaa takuuajan deformaatiota (uusilla teillä 2- 6 mm), piste B takuuajan lopussa mitattua urasyvyyttä ja piste C ekstrapoloitua käyttöikää, jos keskimääräinen vuositasolle laskettu kulumisnopeus ylittää Tiehallinnon oletaman tason. Portaittainen sininen viiva edustaa kuvassa deformaation kehittymistä ajassa. Deformaation oletetaan lähes pysähtyvän talvikaudella. Menettelyssä takuuajan jälkeinen deformaatio jätetään huomioimatta käyttöikäarviossa. Deformaation määrää ja sen nopeutta ei ole riittävästi selvietty tähän mennessä. (Tiehallinto 2004).



Kuva 1.2. Esimerkki päällysteen urautumiskäyttöiän ennustamisesta Tiehallinnon antaman deformaatioarvon ja takuuajan lopun uramittausten pohjalta urakoitsijan kannalta. Takuuajan lopussa tehty mittaus osoitti arvioidun kokonaisurasyvyyden ylittyneen (deformaatio + nastarengaskuluma takuuajana. Takuuajana tehdyistä seurantamittauksista voidaan kuitenkin erottaa deformaation osuus, joka muodostui Tiehallinnon olettaa arvoa suuremmaksi (urasyvyyden kasvoi pisteestä A pisteeseen A₁), mutta vastaavasti mitattu nastarengaskuluma (A₁ – B₁) alitti oletetun urautumisnopeuden, jolloin tavoitekäyttöikä ylittyy (piste C₁). Oletetusta suurempi deformaatio ja Tiehallinnon oletuksen mukainen kuluma johtaa tavoitekäyttöiän alitukseen (Tiehallinto 2004).



Kuva 1.3. Esimerkki päällysteen urautumiskäyttöiän ennustamisesta Tiehallinnon antaman deformaatioarvon ja takuuajan lopun uramittausten pohjalta vaiheittainrakentamista käytettäessä. Vaiheittainrakentaminen "nollaa" syntyneen uran ja deformaatiourautuminen on jo hidastunut toisen päällystysvaiheen jälkeen. Takuuajan lopun deformaatio on esitetty pistellä A_2 . Vaikka nastarengaskuluman nopeus ylittääkin oletuksen mukaisen arvon, niin esimerkissä tavoiteikä (C₂) kuitenkin ylittyy. Kuvan kaarevat viivat hahmottavat deformaation kehittymistä rakentamistoimenpiteen jälkeen. Vaiheittainrakentamisen yleistyessä ja kokemuksen kasvaessa tavoiteikää mahdollisesti nostetaan (Tiehallinto 2004).

Eri urakkatyypeissä deformaatiolle annettavat oletusarvot tulevat vaihtelevaan. Päälystysurakassa deformaation oletusarvo jää pieneksi, rakenteen parantamisurakassa jo suuremmaksi ja uuden tien osalta deformaation osuus voi olla merkittävä.

Tutkimuksen tulosta voidaan käyttää mm. seuraaviin, edellä esitettyjä tarpeita hyödyntäviin tarkoituksiin:

- Deformaation määrän ja esiintymispaikan mittaamiseen. Tietoa voidaan käyttää tilaajan ja urakoitsijan laadunvalvonnassa ja esim. urakoitsijoiden välisissä vastuukysymysten selvittelyissä.
- Rakenteen optimoinnissa kantavuusmitoituksen rinnalla. Urakoitsija voi valita rakennekerrosten materiaalit deformaatio-ominaisuuksien perusteella ja mitoittaa riittävät kerrospaksuudet. Urakoitsijalle syntyy näkemys deformaatioon olennaisesti vaikuttavista tekijöistä.
- Hankintamenettelyssä rakenteen deformaatiokestävyyden laskennallisessa osoittamisessa – sen jälkeen, kun mallien ja menettelyjen toiminta on todennettu.
- Toimivuuspohjaisen rakentamis- ja kunnossapitourakan elinkaarikustannusten hallinnassa.

2 DEFORMAATION MÄÄRITELMÄ

2.1 Deformaation muodostuminen

Deformaatiota syntyy kaikkiin tien rakennekerrokseen päällysteestä pohjamaan (taulukko 2.1). Sidotuissa kerroksissa deformaatio voi parhaimmillaan olla lähes olematon, mutta sitomattomissa kerroksissa sitä esiintyy aina mitattavia määriä.

Päällysteen urautumisen aiheuttaa nastarengaskuluma, päällysteen ja alempien rakennekerrosten deformaatio. Näistä kuluma on päällysteen kulutuskestävyyden ja liikennemäärän funktio. Päällysteen deformaatio on puolestaan merkittävästi päällystemassan koostumuksen ja rakenteen funktio: kiviaines, tyhjätila, bitumin laatu ja määrä. Lämpötila, liikenteen kuormitus ja nopeus vaikuttavat myös deformaation määrään. Kiviaines – muuttuja sisältää taulukossa 2.1 rae- ja rakeisuusmuuttujat, minerologian, lujuuden ja tyhjätilan. Bitumi -muuttuja kattaa bitumin jäykkyyden ja määrän sekä täyttöasteen. Sideaine –muuttuja sisältää bitumin ja muiden sideainesten vastaavat muuttujat.

Sitomattoman kerroksen deformaatio määräytyy kuormituksesta, materiaali- ja tilaominaisuuksista: pysty- ja leikkausjännitys, tiiveys, kosteus, kuormituskertaluku. Tiivistys -termi taulukossa 2.1 kattaa tiivistysprosessin, kaluston, kerrospaksuudet, työ määrän ja laadunvalvonnan. Olosuhteisiin kuuluvat lämpötila ja kosteustila. Sitomattomilla materiaaleilla löyhtymistä ja uudelleentiivistymistä tapahtuu myös jääty mis-sulamissykli en johdosta. Uudelleentiivistyminen johtaa osalla materiaaleja kosteuden läsnäollessa myös deformati onmiseen.

Pohjamaan deformaatio määräytyy samoista tekijöistä, ja rakenteellinen mitoit us – toteutunut tien rakennekerros-paksuus – määrää deformaation. Deformaatio on ei kuitenkaan lasketa konsolidaatiopainumaa pohjamaassa (tai rakenne-kerroksissa).

Stabiloitujen kerrosten deformaatio määräytyy samoin kuin päällysteillä ja sitomattomissa kerroksissa. Kuormitus (ak siaalinen ja deviatoorinen), tyhjätila / tiiveys, kosteus, periodit, stabilointien pysyvyys/turmeltuminen vaikuttavat deformaation määrään.

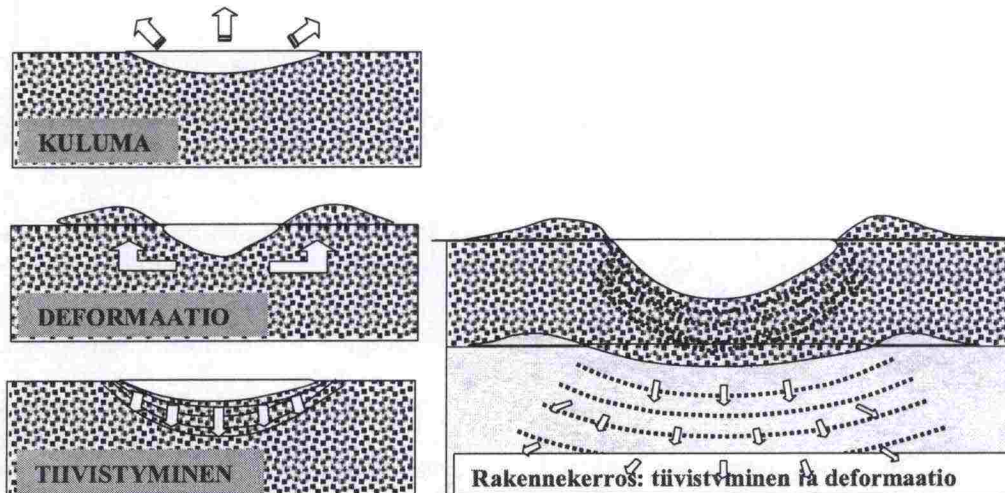
Oheisessa kuvassa (kuva 2.1) on hahmoteltu kokonaisuran jakautumista tierakenteen eri kerrok siin. Päällysteen urautuminen sisältää nastarengaskuluman ja koko rakenteen yhteenlasketun deformaation. Tärkeätä on huomata myös deformaatiouran leviäminen syvem mällä rakennekerroksissa. Deformaatiota ei välttämättä kehity pelkästään rakennekerroksissa, vaan sitä saattaa muodostua merkittäviä määriä myös pohjamaan pintaan erityisesti, jos tierakenne on hyvin ohut ja rakennekerrosten jäykkyydet pieniä.

Deformaatiouran kehitys on nopeampaa alussa, kun uusi rakenne otetaan liikenteelle siinä tapahtuvan jälkitiivistymisen takia. Deformaation kehittyminen siis yleensä hidastuu ajassa, kun taas päällysteen nastarengaskuluman taso säilyy lähes vakiona. Vaikka kuluma pysyy lähes vakiona eri vuosina, niin urautuminen kiihtyy uran keskittäessä liikennettä uraan.

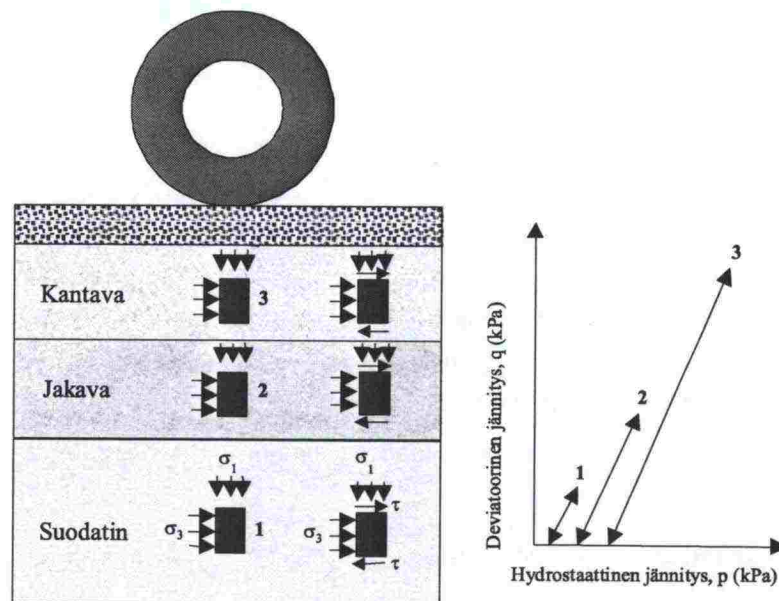
Taulukko 2.1. Deformaation syntymekanismit ja niihin vaikuttavat tekijät tie-
 rakenteen eri kerroksissa.

Tarkasteltava kerros	Deformaation aiheuttava mekanismi (vaikuttavat tekijät) ¹⁾
Kulutuskerros	Tiivistyminen, plastinen virtaus (kiviaines, bitumi, tiivistys, kuormitus, lämpötila, vesi)
Sidekerros	Tiivistyminen ja plastinen virtaus (kiviaines, bitumi, tiivistys, kuormitus, lämpötila, vesi)
Sidottu kantava	Tiivistyminen, leikkautuminen, murtuminen (kiviaines, sideaine, tiivistys, lämpötila, pysyvyys, kuormitus, vesi)
Sitomaton kantava	Tiivistyminen, leikkautuminen (kiviaines, tiivistys, kuormitus, rapautuminen, vesi, jäätyminen ja sulaminen)
Sitomaton jakava	Tiivistyminen, leikkautuminen (kiviaines, tiivistys, kuormitus, vesi, jäätyminen ja sulaminen)
Sitomaton suodatin	Tiivistyminen, leikkautuminen (kiviaines, tiivistys, kuormitus, vesi, jäätyminen ja sulaminen)
Penger	Tiivistyminen, leikkautuminen (kiviaines, tiivistys, kuormitus, vesi, jäätyminen ja sulaminen)
Pohjamaa	Tiivistyminen, leikkautuminen – routiminen ja konsolidaatio (pohjamaan tyyppi, olosuhteet: tiiveys, kosteus, lämpötila ja kuormitus)

¹⁾ nastarengaskulumaa ei tarkastella tässä yhteydessä



Kuva 2.1. Urautuminen, deformaatio ja tiivistyminen päällysteessä ja kantavassa kerroksessa. Sitomattomissa kerroksissa tiivistyminen (tilavuus pienenee) ja leikkautumisen (tilavuus lähes vakio tai kasvaa) aiheuttama deformaatio ovat uran muodostumisen syyt.



Kuva 2.2. Pyöräkuorman aiheuttama jännitysmuutos eri kerroksissa. Kantavassa jännityslisäys ja sen muutos on suuri ja suodatinkerroksessa vastaavasti muutokset ovat pieniä. Niinpä eri kerrokset on jaettava useampaan alikerrokseen deformaatio-laskentaa varten. Kuormituksen keskilinjan ulkopuolella materiaaliin syntyy myös leikkausjännityksiä.

Jälkitiivistyminen on osa tierakenteen kokonaisdeformaatiota. Deformaatio on kuormituksen johdosta tapahtuvaa materiaalin tiivistymistä tai muodon vääristymistä (leikkautumista) (kuva 2.2). Tiivistyminen tapahtuu lähes yksiaksiaalisesti – rakenne painuu pystysuunnassa. Leikkautuminen aiheuttaa myös sivusuuntaisia siirtymiä, joissakin tapauksissa ilman tiivistymistä ja jopa rakennetta löyhdyttään. Sitomattomilla materiaaleilla deformaatiota tapahtuu raerungon tiivistymisen, eli rakeiden kiertymien, siirtymien ja keskinäisten liukumien seurauksena. Vesi vaikuttaa deformaatioon kahdella tavalla: vähentämällä leikkauslujuutta kontaktipinnoissa (mm. alentamalla rakeiden välistä imupainetta, eli matrix suction:ia), tai aiheuttamalla materiaalin sisäistä eroosiota. Sidotuilla materiaaleilla puhdas deformaatio johtuu vastaavasta syystä – sideaine voi toimia rakeiden välisenä ”liimana”, mutta myös ”liukastusaineena”).

Luiskan läheisyys vaikuttaa deformaatioon pienentämällä rakenteen jäykkyyttä. Jäykkyys pienenee nimenomaan vaakasuuntaisen tuennan heikentyessä luiskan läheisyydessä. Luiskan vaikutuksen ulottuma ja suuruus riippuu luiskan jyrkkyydestä, mutta kokemukseräisesti voidaan arvioida luiskan vaikutuksen ulottuvan jyrkillä luiskilla ($N > 3$) 2,5 metrin, loivahkoilla ($3 \leq N < 6$) 2,0 metrin ja loivilla ($N \geq 6$) 1,1 metrin päähän luiskan ylänurkasta. Luiskan kaltevuus määritellään 1:N:ksi. Luiskan deformaatiota lisäävä vaikutus on pieni (alle 10 %) pyöräuran kohdalla, mikäli luiskan kaltevuus on loivempi kuin 1:10 / Korkiala-Tanttu & al. 2002/.

2.2 Deformaatioon vaikuttavat tekijät

Deformaatiota eli pysyvää muodonmuutosta tierakenteen eri kerroksiin aiheutuu siis:

- kuormituksesta (jännitystila, -taso, jännitysten kiertyminen, kuormituskertojen määrä, kuormitushistoria),
- materiaalista (rakeisuus, maksimiraekoko, hienoaines, lujuus, mineralogia, sideaineen tyyppi ja määrä) ja
- tilasta ja olosuhteista (tiivystila/jälkitiivistyminen, kosteustila, lämpötila, jäätyminen ja sulaminen, rakenteen geometria)

Pelkistetysti voidaan sanoa, että deformaatiota syntyy päällysteen ja rakennekerrosten jälkitiivistymisestä, kuormituksen aiheuttamasta kerrosten leikkautumisista ja routaantumisen (jäätymis-sulamis syklit kosteusherkillä materiaaleilla) aiheuttamasta tiivistymisestä tai leikkautumisesta. Alle on kerätty tärkeimmät muuttujat. Tarkemmin näitä asioita on käsitelty liitteessä 1.

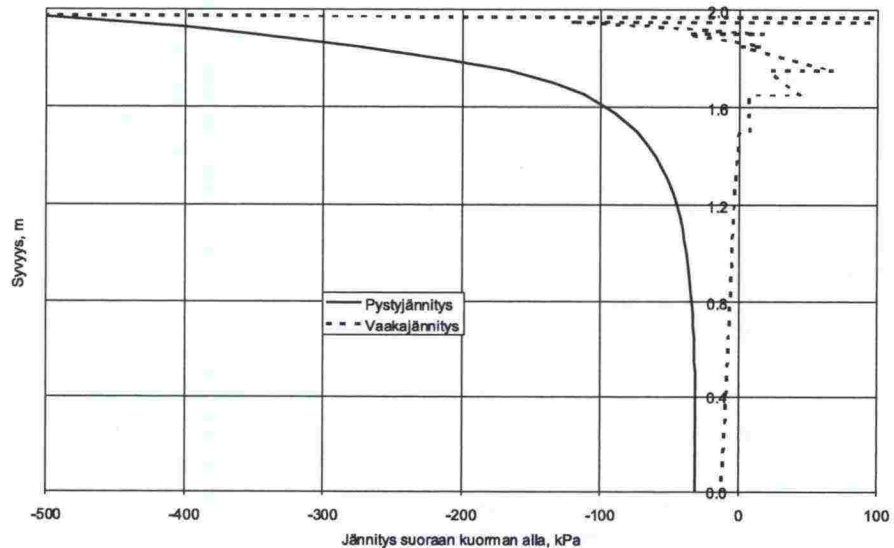
Jännitystila ja -taso

Ajoneuvon akselikuorma ja kuormitetun alan koko rajaavat päällysteeseen kohdistuvan pintajännityksen. Pintajännityksen keskiarvotaso standardi-akselikuormalla on 700 – 1000 kPa. Pinnan pystysuuntainen kosketusjännitys muuttuu rakenteessa alaspäin mentäessä pystysuunnassa hyvin nopeasti (kuva 2.3). Kuormituksen aiheuttaman lisäjännityksen suuruus ja vaimeneminen riippuvat rakenteen lisäksi kuorman suuruudesta ja pyörässä vallitsevasta paineesta. Mikäli pyörän ilmanpaine on suuri, jolloin sen kosketusala on pieni, lisäjännitys kohdistuu enemmän rakenteen yläosiin. Sitä vastoin alhaisempi pyörän ilmanpaine ja suurempi kuorma siirtävät lisäjännitystä syvemmälle rakennekerrokseen (Douglas, 1997). Jännitysten kiertyminen liikkuvan kuorman alla lisää vielä leikkausmuodonmuutoksia ja siten deformaatiota. Vaakajännitys vaihtelee päällysteen alla sitomattoman materiaalin lähes nollajännityksestä sidottujen materiaalien huomattaviinkin vetojännityksiin.

Tutkimuksen laboratoriokokeet on pyritty tekemään jännitystiloissa, jotka toteutuvat rakenteen eri kerroksissa. Kantavan ja jakavan materiaaleilla käytettiin korkeampia deviatoorisen jännityksen arvoja kuin suodatinhiekalta.

Rakenteen vaikutus

Tien rakennekerrokset, niiden jäykkyydet ja kerrospaksuudet vaikuttavat suoraan kerroskohtaisen deformaation määrään. Jäykemmät ylärakenteen kerrokset laskevat alapuoliseen rakenteeseen tulevia kuormia, normaali- ja leikkausjännityksiä, ja vähentävät siten pysyviä muodonmuutoksia. Rakente kannattaa ja tulee mitoittaa deformaatiouran suhteen samoin kuin kantavuuden suhteen.



Kuva 2.3. Kuormituksen aiheuttama jännitystila suoraan kuorman alla (negatiivinen jännitys on puristusta ja positiivinen vetoa). Vaakajännitysten paikalliset vaihtelut johtuvat kerrosrajoista.

Päällysteen ja kantavan kerroksen materiaalien vaikutus

Päällysteen paksuus ja jäykkyys sekä kantavan kerroksen jäykkyys vaikuttavat tehokkaimmin jännitysjakumaan rakenteessa ja siten myös kokonaisdeformaation määrään. Yksi tehokas tapa vähentää deformaatiouraa on käyttää sidottua/stabiloitua – jäykkää ja deformatiota - kantavan kerroksen materiaalia. Sidotun materiaalin käyttö edellyttää tietysti aina kustannushyöty –tarkastelua.

Olosuhteet

Tierakenteen kostuminen, sade-, kondenssi- ja sulamisvesistä tai tulvista johtuen, lisää aina deformaationopeutta. Veden kulkeutuminen rakenteisiin tulee estä kuivatuksella, kaadoilla ja päällystevaurioiden paikkaamisella. Kantavan kerroksen materiaaleilla rakenteen kyllästymisen laskee jäykkyysmoduulia 10 – 50 % (Ekblad 2004) materiaalin hienoainespitoisuudesta riippuen. Rakenteen jäykkyyden aleneminen lisää merkittävästi deformaatiota.

Lämpötila, varsinkin kesähelteillä ja erityisesti alhaisten nopeuksien yhteydessä, vaikuttaa päällysteen ja bitumilla sidottujen stabilointien jäykkyyttä alentavasti. Tällöin rakennekerrokset altistuvat selvästi suuremmille jännityksille ja samalla sidotuissa materiaaleissakin alkaa tapahtua deformatiota eli rakenteeseen kehittyy lisää deformaatiouraa.

Tiivistystyö

Rakentamisen tuotantotekniikka vaikuttaa erittäin merkittävästi deformaation syntyyn. Liian paksuina kerroksina ja huonosti tiivistetyt kerrokset aiheuttavat ajan ja kosteuden lisääntymisen kanssa deformaatiouraa. Vastaava ongelma esiintyy kaupunkien katuverkossa kaivantojen täyttöjen hankalan tiivistämisen johdosta.

2.3 Deformaatiota vähentävät tekijät

Deformaatiota tien rakenteessa ja sidotuissa kerroksissa voidaan vähentää tuotantotekniikan keinoin. Tiivistämisellä sitomaton rakennekerros tavaltaan "esikuormitetaan" yli sen jännitystilan, joka rakenteeseen kohdistuu liikennekuormituksen vaikutuksesta. Jos tiivistämisellä onnistutaan aikaansaamaan pysyväksi jääviä esikuormitustiloja, deformaatio pienenee merkittävästi. Tien rakennekerrosten materiaalit ja rakennekerrospaksuudet tulee optimoida ja niiden tiivistäminen tulee ohjeistaa ja toteuttaa oikein. Tiivistystyön ohjausta ja laadunvalvontaa kannattaa tehdä. Tiivistystyön laadunvalvonnassa tulisi täydentää pistemittauksia esim. jatkuvatoimisen, taltioivan tiivistystarkkailun ja koejyräyksen avulla. Tällä menettelyllä urakoitsija saa kuvan tuotantotekniikan vaikutuksesta eri pohja- ja rakenneolosuhteissa, deformaatioon ja kantavuuteen. Tämä tekniikka on jo olemassa ja otettavissa käyttöön tarvittaessa.

Vaiheittainrakentaminen

Tierakenteen deformaatiota voidaan vähentää eri tekniikoilla. Yksi tekniikka on vaiheittainrakentaminen, jossa rakenne otetaan liikenteelle, rakennusaikana päällystämättömänä, sidekerroksella/sidotulla kantavalla päällystetynä ja lopulta kulutuskerroksella pinnoitettuna. Kukin näistä vaiheista tiivistää alla olevaa rakennetta ja vähentää lopullisen kokonaisrakenteen deformaatiota. Riskinä vaiheittainrakentamisessa on kuitenkin se, että sitomattomaan tai sidottuun kantavaan kerrokseen kohdistuu - päällystelaatan ohkaisuudesta johtuen - tarpeettoman suuri pystykuormitus, joka voi vaurioittaa rakeita ja hienontaa kiviainesta tai sidotun kantavan sidoksia (ennenaikainen väsyminen), ja aiheuttaa mahdollisesti myöhemmin esim. kosteuden kanssa jälkitiivistymistä, jopa routimista. Heikoilla pohjilla koko tien rakenne saattaa vaurioitua.

Vaiheittainrakentamisella voidaan vähentää merkittävästi rakenteen pinnan tarkastelujakson aikaista urautumista, joka johtuu deformaatiosta ja kulumasta. Tiehallinnon käsityksen mukaan esim. kahden vuoden aikana vaiheittainrakentaminen vähentää jopa puolet myöhemmästä deformaatiosta. Viivästetyllä kulutuskerroksen levittämisellä saadaan deformaation lisäksi oikaistua myös vaiheittainrakentamisajan kulumaura. Vaiheittainrakentaminen on suunniteltava huolella ja väliaikainen kulutuskerros on tehtävä hyvästä kulutusta kestävästä massasta.

2.4 Deformaatiolaskentamallin periaate

Tässä tutkimuksessa kehitetty deformaation laskentamenettely perustuu tietoon siitä, että kussakin rakennekerroksessa materiaalelementtiin kohdistuu kuormituksesta ja rakennekerrosten jäykkyyksistä ja lujuuksista määräytyvä jännityspulssi. Pulssin suuruus vaihtelee tarkastelupisteen paikan syvyyden ja sivusijainnin mukaan. Tässä työssä jännityksiä on tarkasteltu lähinnä pyörän (pyörien) kuormittaman alueen keskellä tai sen reunalla. Erilaisia jännityspulsseja on havainnollistettu esim. kuvissa 2.2 ja 2.4.

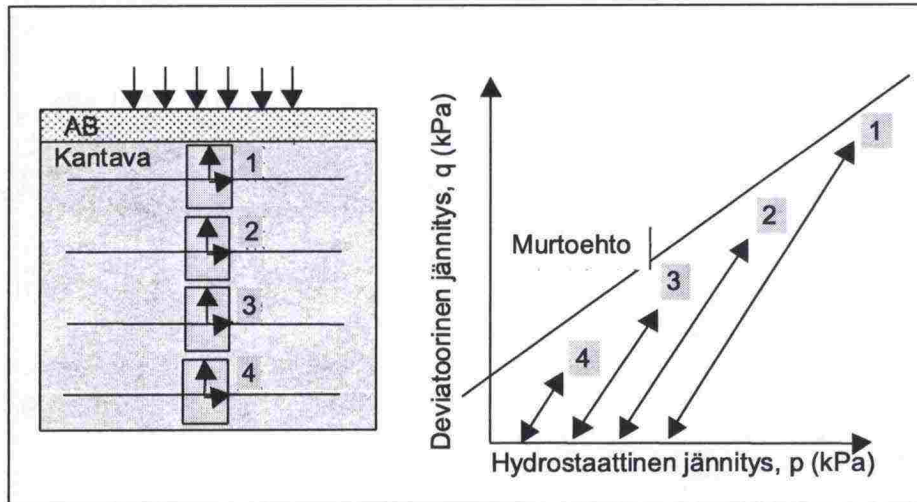
Kantavassa kerroksessa, jossa vallitseva staattinen pysty- ja vaakajännitys on pieni ja missä kuormitus aiheuttaa suurimmat pystyjännitysmuutokset, kerros joudutaan jakamaan alikerroksiin laskentaa varten. Tämä johtuu jännityslisäyksen jakautumisesta ja nopeasta pienenemisestä pystysuunnassa. Tämän johdosta myös mallin parametrien määrittämiseen tarvittavat kokeet on tehtävä materiaaliakohtaisesti useassa eri jännitystilassa. Tiedossa on lisäksi, että kuormituksen allakin ylempien kerrosten vaakajännitykset jäävä hyvin pieniksi tai niihin kehittyy jopa vetojännityksiä. Vetojännityksen suuruus riippuu käytetystä ratkaisumenetelmästä.

Laskenta perustuu yksinkertaistettuun materiaalmalliin, jonka parametrit määritetään syklisen kuormituskokeiden avulla rakenteessa toteutuissa jännitystilassa ja kuormitusolosuhteissa. Kunkin kokeen pohjalta määritetään siinä jännitystilassa toteutuva pysyvä muodonmuutos halutun kuormituskertaluvun mukaan. Kuvissa 2.4 – 2.5 on kuvattu mallin rakenne ja mallin parametrien kannalta oleelliset kokeet. Kuvassa 2.4 esitetyt jännityspolut on selvyyden vuoksi piirretty vaakasuunnassa erilleen – käytännössä ne ovat jokseenkin päällekkäin, koska staattinen ja kuormituksen aiheuttama vaakajännitys on hyvin pieni rakenteen yläosassa ja erityisesti kantavassa kerroksessa.

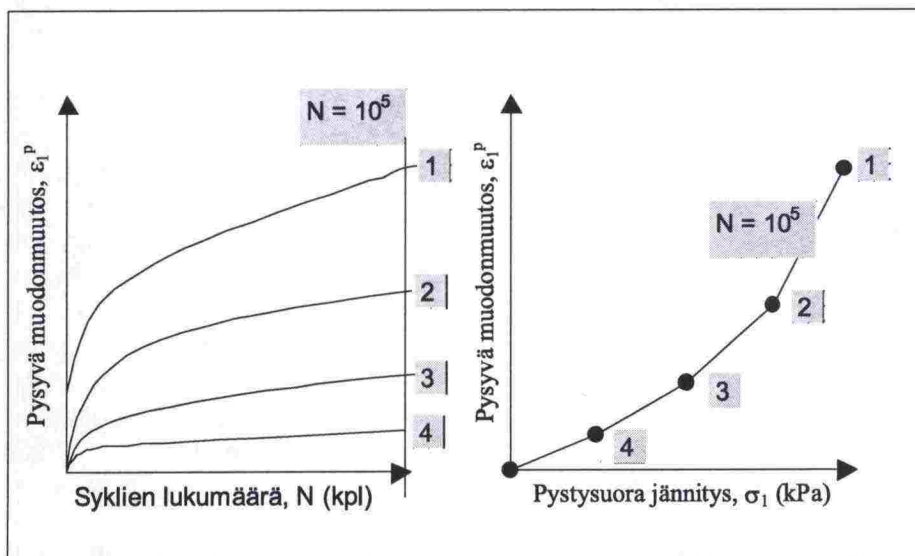
Mallia varten tarvitaan kaksi yhteyttä: 1) maksimijännityksen ja pysyvän muodonmuutoksen suhde rakenteessa toteutuvassa jännitystilassa määritettynä, ja 2) pysyvän muodonmuutoksen määrä kuormituskertaluvun suhteen. Molemmat yhteydet saadaan laboratoriokokeista. Laboratoriokokeiden mittakaavan ja reunaehtojen yksipuolisuuden vuoksi kaikki tulokset on todennettava myös todellisten kohteiden rakennemittauksin. Luotettavampi kuva käyttäytymisestä, deformaation määrästä ja nopeudesta saataisiin tietysti hyvin hallituissa olosuhteissa tehdyistä koetiemittauksista. Tämä on ainoa keino esim. louherakenteiden muodonmuutosten määrittämiseen.

Luotettavin tapa tehdä syklisiä kuormituskokeita olisi testata jokainen jännitystila erillisellä näytteellä, jolloin edellinen kuormitusjakso ei vaikuta näytteen muuttumiseen. Tämä menettely on kuitenkin erittäin aikaavievää ja kallista. Lisäksi täysin samanlaisten näytteiden tuottaminen on vaikeaa. Tästä syystä tutkimuksessa käytettiin moniportaisia syklisiä kuormituskokeita. VTT:n käsitys on se, että moniportaisella kokeella saavutetaan sama pysyvä muodonmuutostaso kullakin jännitystasolla, kuin tavanomai-

sella kokeellakin, mutta koetekniset vaihtelut ja kulut minimoiden. Vastaa-
 van käsityksen on esittänyt myös Gidel & al. (2001).



Kuva 2.4. Pyöräkuorman aiheuttama jännitysmuutos kantavassa kerrok-
 sessa. Sykliset kokeet tehdään rakenteessa toteutuvilla jännitys-
 poluilla.



Kuva 2.5. Syklisenkuormituksen aiheuttama pysyvä muodonmuutos ja siitä
 halutulla kuormituskertaluvulla määritetty pystyjännitys – pysyvä
 muodonmuutos –yhteys.

Näytteiden tiiveys- ja kosteustilat vaikuttavat voimakkaasti tulokseen. Näitä asioita ei ole voitu kattavasti tutkia tässä tutkimuksessa tehtyjen laboratoriokokeiden yhteydessä. Tiiveyden vaikutus kokonaismuodonmuutoksen (defomaation) määrään ja kehittymisnopeuteen voidaan riittävän tarkasti määrittää kokeellisesti. Samoin voidaan suuruusluokalleen selvittää myös kosteuden vaikutus.

Maksimiraekoon vaikutus on otettava huomioon esim. koetiekonetutkimuksista, tai pohjoismaissa tehdyistä tutkimuksista. Vaikutuksen suuruusluokka joudutaan ottamaan huomioon korjauskertoimella.

Tiiveyden ja kosteustilan hallitsemiseksi on mallissa empiiriset kertoimiin tai muuhun aineistoon perustuvien korjauskertoimien käyttömahdollisuus. Routimisen ja epätasaisen painuman aiheuttamaa rakenteiden löyhtymistä ei voida yksinkertaisin laboratoriokokein määrittää.

3 LABORATORIOKOKKEET

3.1 Sykliset kuormituskokeet

Laboratoriokokeet

Laboratoriokokeiden tavoite oli tuottaa tietoa materiaalien aksiaalisesta deformaation tilasta materiaalisessa rakenteessa toteutuvassa pysty- ja leikkausjännitys-tilassa. Kokeet tehtiin syklisinä voimaohjattuina kolmiakselikokeina. Kokeissa käytettiin pohjana CEN –standardia ”EN 13286-7 Unbound and hydraulically bound mixtures, Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures” ja siinä esitettyjä jännitys-polkuja. Standardin jännityspoluista kuitenkin poikettiin, koska standardin määrittämä koekohtainen kuormitusportaiden määrä oli liian suuri ja osa jännitys-poluista tasoltaan liian suuria. Aikaisemmin Tiehallinnon HVS -selvityksien yhteydessä kalliomurskeelle tehtiin useita erillisiä deformaatiokokeita, jokainen omalla jännityspolullaan. Tässä työssä tehtyjä deformaatiokokeita varten otettiin kuitenkin käyttöön kolmen kokeen sarja usealla leikkausjännitystasolla tehtyjä syklisiä kuormituskokeita. Kuvassa 3.1 on esitetty yhden koesarjan jännityspolut p-q –koordinaatistossa.

Alunperin tavoitteena oli tehdä vain yksi moniportainen koe, jossa kokeen aikana vaihtuu sekä sellipaine että deviatoorisen jännityksen tasot (kuva 3.2). Näissä ensimmäisissä hiekalla tehdyissä kokeissa saatu kuva deformaatiokäyttäytymisestä korkeammilla leikkausjännitystasoilla jäi kuitenkin varsin karkeaksi. Tämän johdosta tutkimusten myöhemmässä vaiheessa käytettiin kolmen kokeen (eri näytteet) sarjaa, jossa sarjan kaikki eri sellipaineilla tehtävät kokeet tehtiin lopussa neljällä – kuudella eri deviatoorisen jännityksen tasolla (kuva 3.2).

Syklisiä kolmiakselikokeita käytettiin deformaatio-ominaisuuksien määrittämiseen, vaikka tiedossa on, että se ei täysin pysty simuloimaan liikkuvan pyöräkuorman aiheuttamaa jännityskäyttäytymistä materiaalisessa. Kolmiakselikoe on kuitenkin ainoa näytteiden valmistukseltaan, kustannuksiltaan ja kestoltaan mahdollinen koemenettely. Vaihtoehtoiset menetelmät: TKT – laite tai HVS –laite ovat mahdollisuuksien ulkopuolella, kun kyseeseen tulevat nopeat ja kustannustehokkaat materiaalien vertailukokeet. Lisäksi työn tavoitteena oli tuottaa tutkituista materiaaleista myös aiemmin Kevyt-päällysteisten tierakenteiden projektissa kehitetyn ICT –deformaatio-indeksi –menettelyn mukaiset arvot materiaalien luokittelua varten.

Mitatut suureet

Kokeissa näytteistä mitattiin sellipaine, syklinen aksiaalinen kuormittava voima, aksiaalinen ja vaakasuora siirtymä. Mitatuista suureista voidaan määrittää aksiaalinen jännitys sekä aksiaalinen ja vaakasuora muodonmuutos, ja niistä edelleen Poisson –luku. Mittausten perusteella kustakin

kokeesta määritettiin aksiaalisen pysyvän deformaation lisäksi jäykkyysmoduuli ja Poisson –luku tietyillä syklimäärillä. Nämä tiedot on kerätty liitteisiin.

Kuormitustasot ja kuormitus syklien määrät

Kokeen kaikki kuormitustasot (jännityspolut) lähtivät liikkeelle noin 5 kPa deviatoorisesta jännityksestä. Kaikki jännityspolut pyrkivät leikkausjännitystasoon, jossa materiaali murtuu, eli käytännössä näytteeseen kehitty merkittävä aksiaalinen muodonmuutos. Käytännön syistä kokeet keskeytettiin automaattisesti, kun aksiaalinen kuormitus kasvoi yli kolmen prosentin.

Kuormitustaajuus oli kaikissa kokeissa 5 Hz ja kuormitus oli sinimuotoinen (haversine). Sitomattomilla materiaaleilla käytetyn taajuuden ei oleteta aiheuttavan näytteen ominaisuuksien muuttumista esim. materiaalin lämpenemisen johdosta. Bitumilla sidotuille materiaaleille joudutaan asia huomioimaan erikseen.

Kokeissa käytetyt kuormitus syklien määrät olivat ensimmäisissä kokeissa 50.000 sykliä per kuormitustaso ja myöhemmissä kokeissa 100.000 sykliä per kuormitustaso. Kuusiportaisessa kokeessa syklien kokonaismäärä oli siis 1.200.000 sykliä per koe. Tällaisen kokeen kesto aika oli 2.8 vuorokautta.

Jännityspolku

Jännityspolun suunta p-q –koordinaatistossa määräytyy laiteteknisistä syistä. Jännitys-polun kulmakerroin ko. koordinaatistossa on aina 3.0 (kuva 3.1 ja 3.2). Jännityspolun pituus määräytyy tarkastelupisteen etäisyydestä päällysteen pintaan. Lähellä pintaa vallitseva staattinen pystyjännitys on pieni – kahdeksan cm (8.0 cm) päällysteen alla vallitseva kuormittamaton staattinen pystyjännitys on noin 2 kPa. Kuormituksen aikana jännitys nousee tasolle, joka määräytyy rakennekerrosten jäykkyyksistä ja kuorman suuruudesta ja kuormitus pinnan laajuudesta. Tutkimuksessa jännityspolku valittiin alkamaan 5.0 kPa deviatoorisesta jännityksestä. Sellipaine määritti aina vastaavan hydrostaattisen paineen (p) arvon. Syvemmillä rakenteissa, erityisesti pohjamaan pinnassa vallitseva pysty- ja vaakajännitys voi nostaa deviatoorisen jännityksen tasoa – samalla kun kuormitus pulssin aiheuttaman jännityspolun pituus lyhenee. Tässä työssä ei ole tarkasteltu jännityspolun pituuden vaikutusta deformaatio-ominaisuuksiin, vaan käyttäytymisen on oletettu olevan siitä riippumaton.

Alustavissa kimmoisissa tarkasteluissa, jotka tehtiin Plaxis –ohjelmalla, jännityspolkujen suunnat yhtyivät kantavaa kerrosta lukuun ottamatta varsin hyvin kolmiakselikokeessa toteutuvaan jännityspolkuun. Kantavassa kerroksessa poikkeama oli suurempi, mutta sen ei katsota vaikuttavan tulosten käytettävyyteen.

Sellipaineet

Koesarjaan valitut kolme sellipainetta (σ_3 : 20, 45 ja 70 kPa) tulivat CEN-standardista suoraan. Tässä tutkimuksessa rajoituttiin näihin kolmeen selli-

paineeseen siksi, että ne vastasivat luokalleen aiemmassa HVS -tutkimuksessa deformaatiokokeissa käytettyjä sellipaineita. Tuolloin sellipaineisiin päädyttiin Plaxis -ohjelmalla toteutetun rakenteen jännitystila-analyysin avulla. Valitut sellipaineet edustavat keskimääräistä vaakajännitystasoa kuormituspulssin aikana.

Tiiveysaste

Laboratoriokokeet tehtiin tierakenteen kerrosten vaatimusten mukaisissa tiiveys-asteissa. Kantavan ja jakavan kerroksen materiaalit tiivistettiin 97 % tiiveysasteeseen ja suodatinhiekkä 95 % tiiveysasteeseen. Suodatinhiekkalla tehtiin lisäksi yksi koe tiiviimmässä 100 % tiiveysasteessa. Vastavasti myös hiekkaisella soralla tehtiin koesarja 100 % tiiveysasteessa.

Näytteet sullottiin muotiin kerroksittain kuudessa kerroksessa. Hiekkalla sulkolonta tehtiin käsin sullomalla, mutta karkeammilla materiaaleilla käytettiin Kango -tärvasaraa ja hieman muotin halkaisijaa pienempää tiivistyslevyä. Näytteen tiivistystapa vaikuttaa tulokseen. Tiivistystavan vaikutusta ei voitu tässä tutkimuksessa selvittää. Käytetyn tiivistystavan oletetaan johtavan pienempiin pysyvän muodonmuutoksen arvoihin kuin muiden tiivistysmenetelmien (kiertotiivistin, staattinen puristus, tärjymuotti).

Kosteustila

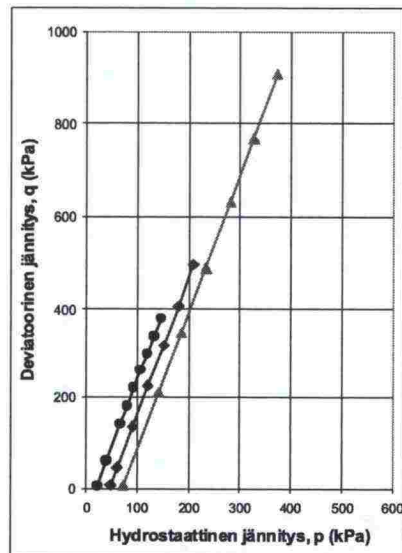
Laboratoriokokeissa käytetyt näytteet tiivistettiin materiaalienkohtaisessa kosteustilassa, joka määräytyi optimivesipitoisuuden mukaan, mutta kantavan materiaaleilla myös harkintaa soveltaen. Tavoitteena oli kuitenkin taso, joka on optimivesipitoisuus vähennettynä kahdella %-yksiköllä, mutta kuitenkin alle neljä paino-%. Näin valittiin siksi, että tierakenteen mittaukset ovat osoittaneet keskimääräisen tason olevan luokkaa 3 - 4 paino-%. Hiekkalla kriteeri oli kuitenkin optimi-vesipitoisuus – kaksi %-yksikköä. Kokeiden määrän rajallisuudesta johtuen ei selvitetty erityisen kostean tai peräti kylästetyn materiaalin käyttäytymistä. Kosteuden vaikutus voidaan täydentää myöhemmin tarvittaessa.

Yhteenveto tehdyistä deformaatiokokeista

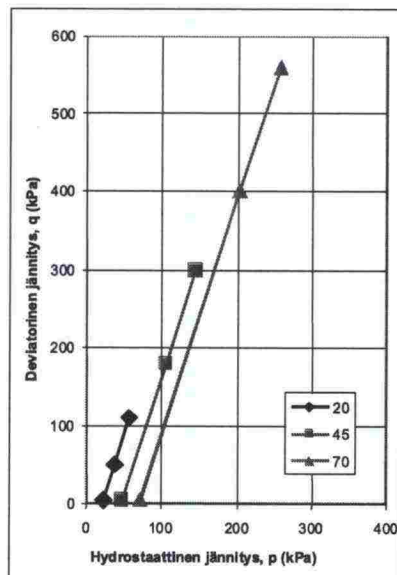
Liitteeseen (liite 2) on koottu kaikki tehdyt deformaatiokokeet materiaaleittain. Liitteessä 2 on myös esitetty käytetyt jännityspolut ja tilamuuttujat (tiheys ja vesipitoisuus kokeen alussa).

ICT -tiivistävyyskokeet ja luokituskokeet

ICT -kokeet tehtiin Kevytpäällysteisten tierakenteiden projektissa kehitetyllä ja kirjatulla menettelyllä (Jauhiainen & Törnqvist 2001). Kokeessa valitussa kosteustilassa oleva näyte tiivistetään ICT -laitteessa tietyllä kuormitusjärjestelyllä. Tuloksista lasketaan tiivistymisindeksi. Kaikille tutkimuksessa käytetyille HVS -materiaaleille: Teiskon kalliomurske, hiekka ja hiekkainen sora oli tehty ICT -kokeet tiivistymiskäyttämisen selvittämiseksi kyseisen aiemman tutkimuksen yhteydessä. Ainoalle uudelle materiaalille, Voutilan kalliomurskeelle, tehtiin vastaava koe.



Kuva 3.1. Tyypillinen deformaatiokoesarja, jossa kussakin eri näytteellä ja yhdellä sellipaineella tehdyssä kokeessa on kuusi eri kuormitustasoa.



Kuva 3.2. Hiekan deformaatiokoesarja, jossa yhdellä näytteellä ja kolmella eri sellipaineella tehdyssä kokeessa on yhteensä kuusi eri kuormitustasoa.

Tutkituille materiaaleille tehtiin myös täydentävät luokituskokeet: parannettu Proctor –koe ja rakeisuusmäärittäminen, koska haluttiin varmistaa käytettyjen materiaalien luokitusominaisuuksien oikeellisuus.

Projektissa ei tutkittu saven tai siltien syklisiä deformaatiokäyttäytymistä. Projektissa ei tutkittu myöskään sidottujen tai stabiloitujen materiaalien deformaatiokäyttäytymistä. Ainoa stabiiloituista materiaaleista julkisesti saatavissa oleva tieto löytyy TPPT –projektin materiaalitutkimusosion bitumi-emulsio- ja vaahtobitumistabilointien deformaatiotutkimuksista.

3.2 Deformaation määrittäminen laboratorioskokein

Tutkimuksen tavoite oli tuottaa deformaation määrittämiseen tarvittavaa mallinnustietoa kahta kautta: ennakkokokeet laboratoriossa ja mallien kertomien takaisinlaskenta kenttämittaustuloksista takaisinlaskemalla.

Määrittämissä ehdotetaan monotoonista ja syklisiä kolmiakselikoetta. Näillä kokeilla määritetään materiaalin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet. Lujuutta (kitkakulma ja koheesio/attraktio) tarvitaan syklisen kokeiden kuormitusjännitysten valintaa varten.

Lujuus määritetään yksinkertaisimmillaan yhdellä näytteellä käyttäen moniporaisista kuormituskoetta. Tässä kokeessa, joka tehdään siirtymäohjattuna, sellipainetta muutetaan kesken kokeen. Näin saadaan halutulla jännitysalueella kolme – viisi maksimijännityspistettä lujuuden (kitkakulma ja koheesio) määrittämiseen. Jos halutaan useampi tiiveyksiä tai kosteuspitoisuuksia, on tehtävä useampia kokeita. Hieman luotettavampi kuva materiaalin lujuudesta saadaan leikkaamalla näyte yhdellä vakiosellipaineella. Tällöin näytteen rakenne ei muutu (tiivillä löyhdy ja löyhällä tiivisty) leikkauksen aikana. Lujuus, lähinnä kitkakulma, saattaa tiiviillä materiaaliilla nousta.

Lujuussuoran avulla määritetään kussakin syklisessä kuormituskokeessa käytettävät maksimileikkausjännitystasot. Luotettava kuva vaatii vähintään neljän tai viiden pisteen määrittämistä. Eli syklisiä kuormituskokeita on tehtävä neljällä tai viidellä rinnakkaisnäytteellä – kullakin on oma maksimileikkausjännitystasonsa. Kuormitusjännityksen määrän tulisi olla vähintään 100 000 kappaletta, mielellään enemmän, kun leikkausjännitys ylittää 80 % materiaalin kapasiteettista. Tämä siksi, että käyttäytyminen voi muuttua 100 000 syklin jälkeenkin merkittävästi.

Pysyvien muodonmuutosten määrittämiseen on kaksi mahdollisuutta: 1) yhdessä jännitystilassa tehtävät kokeet (vakioitu sellipaine ja leikkausjännityspulssi) tai 2) vakioitulla sellipaineella tehtävät moniporaiset kuormituskokeet. Ensimmäisessä vaihtoehdossa tarvitaan jokaista tulospistettä varten yksi näyte ja kuormituskoe. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa saadaan jokaisesta näytteestä kolme – kuusi tulospistettä. Tässäkin vaihtoehdossa on syytä tehdä koesarja vähintään kolmella kuormitustasolla.

Kuormituskokeissa käytettävien jännitysten ei tule olla vakioita, koska ne vaihtuvat materiaalin kapasiteetin ja päällysteen rakennekerrosten jäykkyyksien ja paksuuksien mukaan. Tässä työssä on kuitenkin käytetty lähes samoja jännityksiä kaikille materiaaleille, tosin hiekan jännityksiä laskettiin sen lujuustason alhaisuuden johdosta. Taulukossa 3. 2 on esitetty käytettyjä jännitystasoja, joita voidaan harkinnan mukaan käyttää jatkossakin. Melko hyvän kuvan jännitystason ja pysyvän muodonmuutoksen välisestä yhteydestä saa alempana rakenteessa olevilla materiaaleilla jo yhdestä kokeesta erityisesti, jos materiaalin lujuus on tiedossa. Jos tiedossa on jännitystila, johon materiaali enimmillään joutuu, voidaan kokee tehdä käyttäen tätä jännitystilaa maksimijännitystilana.

Taulukko 3.1. Yhteenveto deformaatiokokeista. Tutkitut materiaalit, kokeiden jännityspolut ja tilasuureet sekä syklimäärä per kuormitusporras.

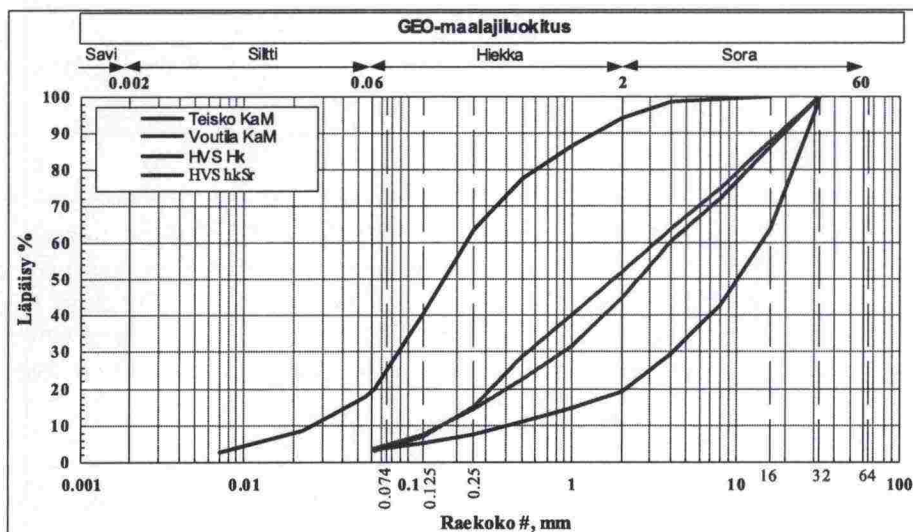
Materiaali	Sellipaineet, σ_3 (kPa)	Jännityspulssi, $\Delta\sigma_1$ (kPa)	Rakennekerros
Savi	20	5 - 50	Pohjamaa
Siltti	20	5- 200	Pohjamaa
Hiekka	20, 45, (70)	5 - 300	Suodatin
Hiekkainen Sora	20, 45, 70	5 – 600 (800)	Jakava (kantava)
Kalliomurske, Teisko	20, 45, 70, (100)	5 – 800 (1000)	Kantava (jakava)
Kalliomurske, Voutila	20, 45, 70, (100)	5 – 800 (1000)	Kantava (jakava)

4 MATERIAALIKOKEIDEN TULOKSET

4.1 Luokitusominaisuudet

Parannettu Proctor –koe ja rakeisuusmääritys tehtiin Teiskon kalliomurskeelle, Voutilan kalliomurskeelle ja hiekkaiselle soralle. Hiekan ominaisuudet olivat tiedossa aiemmista HVS –tutkimuksista (HVS = Heavy Vehicle Simulator, koetiekone). Proctor –kokeiden tulokset on esitetty liitteessä (liite 4), ja rakeisuusmäärityksien tulokset liitteessä (liite 5). Yhteenveto rakeisuusmääritysten tuloksista on esitetty kuvassa 4.1.

Maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus kullekin materiaalille on esitetty taulukossa 4.1.



Kuva 4.1. Tutkittujen materiaalien rakeisuuskäyrät. "HVS –materiaalit" ovat eri HVS –kokeissa käytettyjä materiaaleja. Teiskon kalliomurske on suhteitettu kantavan kerroksen rakeisuusalueelle ja Voutilan kalliomurske on tutkittu esitettyssä rakeisuudessa.

Taulukko 4.1. Tutkittujen materiaalien maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus.

Materiaali	Maksimikuivatilavuuspaino, γ_d (kN/m ³)	Optimivesipitoisuus, w_{opt} (%)
Kalliomurske (Teisko)	21.58	7.25
Kalliomurske (Voutila)	21.93	6.36
Hiekkainen sora (HVS)	21.92	6.04
Hiekka (HVS)	18.74	10.39

4.2 Pysyvät muodonmuutokset

Deformaatiokokeiden tulokset

Sykliisillä kolmiakselikokeilla määritettiin kunkin materiaalin pysyvien muodonmuutosten kertyminen jännitystilan ja kuormituskertojen funktiona.

Kuvassa 4.2 on esitetty hienon hiekan muodonmuutosvaste eli pysyvä muodonmuutos syklien määrän ja aksiaalisen kuormituksen funktiona (kuusi jännitystasoa). Porrasmainen muoto johtuu aksiaalisen kuormitusjännityksen kasvamisesta aina 100.000 syklin välein. Kuvasta näkyy, että kuudennella jännitystasolla näyte on murtunut jo 20.000 syklin jälkeen (vrt. taulukko 3.1). Kuvassa 4.3 on esitetty sama tulos kuormituksen tason mukaan. Vastaavat kuvat muista laboratoriokokeista on koottu liitteeksi (liite 6).

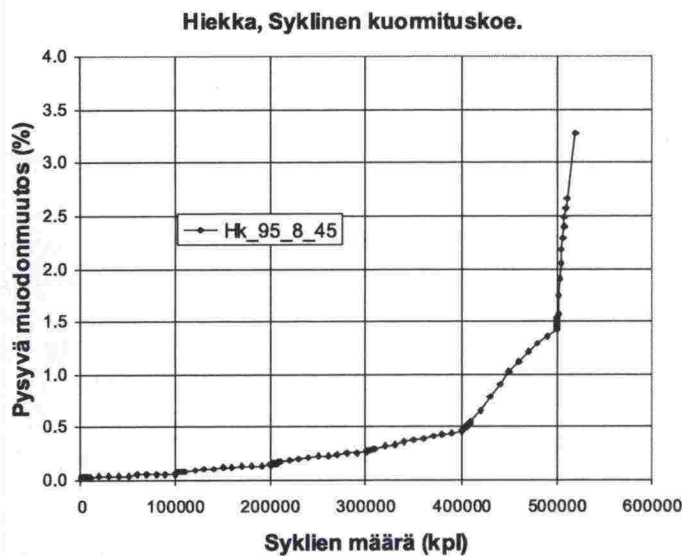
Kaikilla tutkituilla materiaaleilla tehtiin vastaavat kokeet kolmella sellipaineella, ja sellipaineen suhteen muuttuvilla kuormitusportailla (vrt. taulukko 3.1). Näiden kolmen kokeen tuloksista on poimittu tai interpoloitu kuormitustaso – pysyvä muodonmuutos –yhteys yksinkertaistettua deformaatiomallia varten.

Tyypillinen yhdellä sellipaineella tehdyn syklisen kuormituskokeen pysyvän muodonmuutoksen kertyminen on esitetty kuvissa 4.4 ja 4.5. Kuvassa 4.4 on esitetty pysyvän muodonmuutoksen kertyminen kuormituksen alusta ja kuvassa 4.5 on sama tulos esitetty lähtien aina kuormitusportaan alusta, eli kuormitustason nosto on aina "nollannut" syklilaskurin.

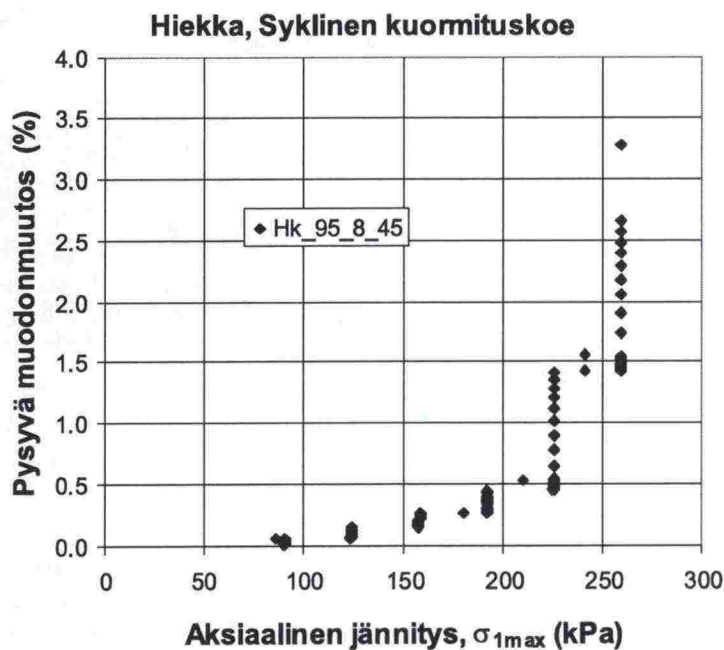
Kuvaan 4.5 on piirretty tulokseen sopiva muodonmuutoksen kertymäfunktio. Funktio on yksinkertainen potenssifunktio (kaava 4.1), mutta se kuvaa kaikkia tutkimuksen tuloksia riittävän, jopa erittäin hyvin. Yhtälön on todettu kuvaavan myös muualla tehtyjä karkeiden materiaalien pysyvän muodonmuutoksen tuloksia (Werkmeister 2003). Kaavassa 4.1 A on kerroin ja B on eksponentti. Koetulosten mukaan sekä kerroin A että potenssi B kasvavat mobilisoituneen lujuuden kasvaessa. Kuvasta näkyy, että myöhemmillä portailla on syklimäärään (N) lisättävä osuus aikaisemmista kuormituksista kertyneistä kuormituskerroista, jotta sovitus onnistuu hyvin.

$$\varepsilon_1^p = A \cdot N^B \quad (4.1)$$

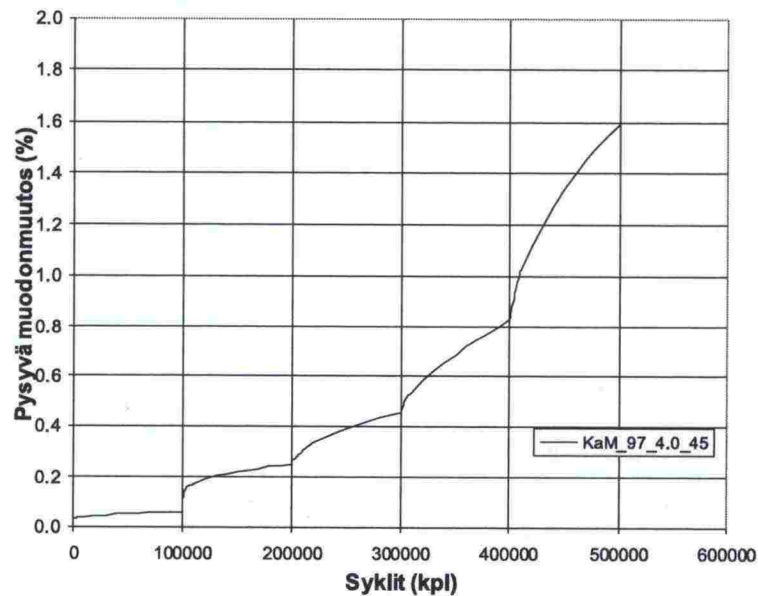
Eksponentin B arvo vaihteli laboratoriokokeissa hiekalla välillä 0.23 - 0.39, hiekkaisella soralla välillä 0.13 - 0.48 ja kalliomurskeilla välillä 0.11 - 0.48. HVS -kokeiden mittaustulokset eri kerroksista ovat suuruusluokalleen samoja. Eksponentti kasvaa mobilisoituneen lujuuden ja vesipitoisuuden kasvaessa. Tässä työssä kehitetyssä deformaation laskentatyökalussa käytetään eksponentilla vakioitua arvoa $B = 0.25$. Arvon käyttö perustuu HVS -kokeiden urautumisnopeuteen sekä Tiehallinnon muihin urautumisaineistoihin /Järvinen 2001, Järvinen 2003/.



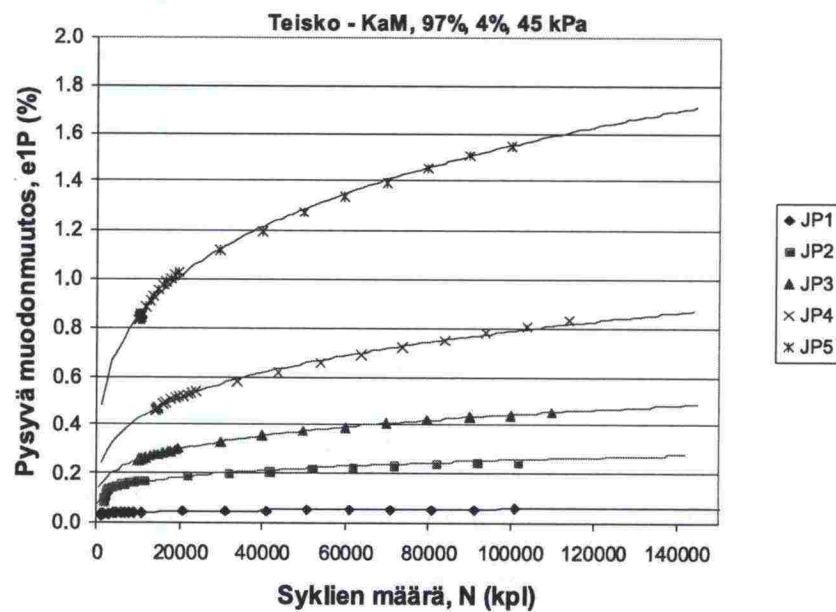
Kuva 4.2. Aksiaalisen pysyvän muodonmuutoksen kertyminen hiekan sykli-
sessä kuormituksessa. Hieno hiekka, alkutiiveysaste 95 %, vesi-
pitoisuus 8 % ja sellipaine 45 kPa. Sykliä määrä 100 000 per
porras.



Kuva 4.3. Aksiaalisen pysyvän muodonmuutoksen kertyminen hiekan sykli-
sessä kuormituksessa kuormitustason mukaan. Hieno hiekka, al-
kutiiveysaste 95 %, vesipitoisuus 8% ja sellipaine 45 kPa.



Kuva 4.4. Aksiaalisen pysyvän muodonmuutoksen kertyminen kalliomurskeen syklisessä kuormituksessa kuormitustason mukaan. Kalliomurske, tiiveysaste 97 %, vesipitoisuus 4% ja sellipaine 45 kPa.



Kuva 4.5. Aksiaalisen pysyvän muodonmuutoksen kertyminen syklisessä kuormituksessa kuormitustason mukaan. Kalliomurske, Teisko, alkutiiveysaste 97 %, vesipitoisuus 4% ja sellipaine 45 kPa.

Laskentatyökalun deformaatiomallit

Tehdyistä deformaatiokokeista määritettiin kunkin materiaalin deformaatio-käyttäytyminen kahta eri mallia varten. Yksinkertaisempi ja laskentatyökalussa käyttöön otettu malli käyttää pystyjännitysinkrementin maksimin ($\Delta\sigma_1$) ja sitä vastaavan pysyvän muodonmuutoksen (ε_1^p) välistä yhteyttä eli yhteys on kaavassa 4.2 sekä kuvassa 4.6 esitettyä muotoa. Koska pystyjännityksen arvo kuormittamattoman rakenteen yläosassa on pieni, niin termi $\Delta\sigma_1$ voidaan korvata termillä σ_1 .

$$\varepsilon_1^p = f(\Delta\sigma_1) \quad (4.2)$$

Laskentatyökalussa käytetyt yhteydet on esitetty kuvassa 4.6 kaikille materiaalityypeille. Näistä saven tulos perustuu Ivar Hovrlin väitöskirjan (Hovrli 1979) tuloksiin ja siltin malli on luotu kirjoituspöytätyönä (hienon) hiekan ja saven välille.

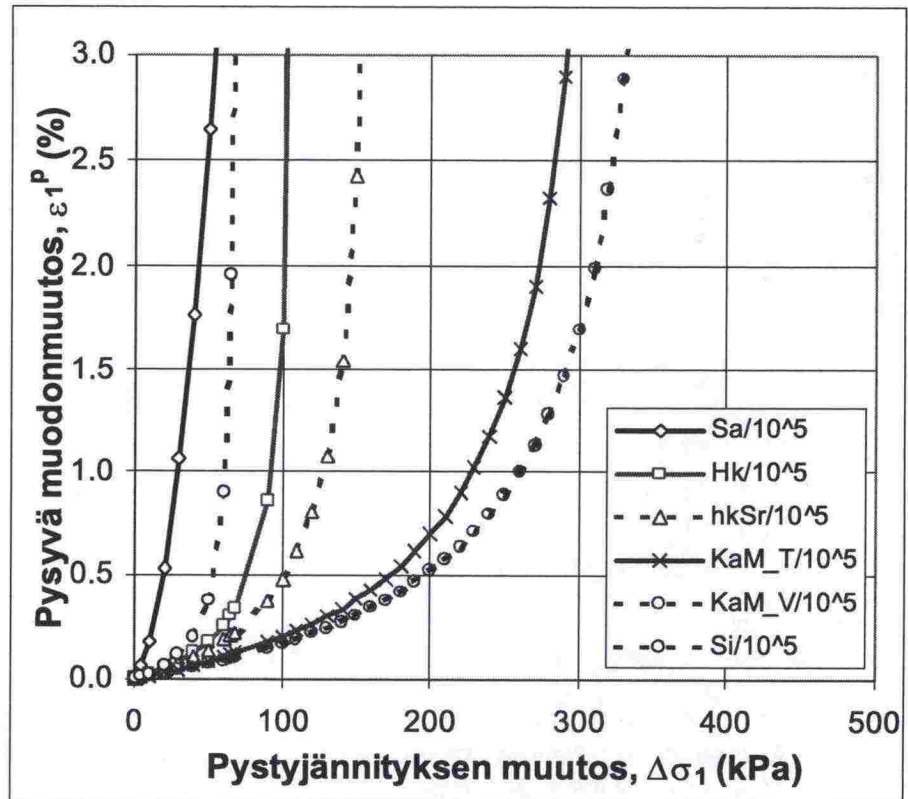
Kuvan 4.6 tulokset on, kuten aiemmin on mainittu, määritetty tiiveille materiaalinäytteille. Nämä näytteet on lisäksi tiivistetty menettelyllä, joka tuottaa vähemmän deformoituvia näytteitä. Tämän johdosta tuloksia tulee pitää pysyvän deformaation alaraja-arvoina, ja kussakin tarkastelussa tulokset on skaalattava vastaamaan oikeata tiiveystasoa. Tulos on lisäksi skaalattu vastaamaan vaakajännitystasoa $\sigma_3 = 0$ kPa pyöräkuorman keskilinjalla.

Toinen, hieman erilainen malli, perustuu havaintoon, että kullakin materiaalilla on rajatulla jännitysalueella voimassa yhteys mobilisoituneen lujuuden (S_m) ja pysyvän muodonmuutoksen suhteen. Kaavalla 4.3 esitetty yhteys on esitetty hiekalle kuvassa 5.9. Tämä malli ottaa paremmin huomioon todellisen (leikkaus-)jännitystilän rakennekerroksissa.

$$\varepsilon_1^p = f(S_m) \quad (4.3)$$

Mallin edellyttämä murtoehto on jouduttu valitsemaan siten, että kokeissa toteutuneet jännityspisteet ovat jääneet murtoehdon sisäpuolelle. Murtoehto ei ole kuitenkaan mitenkään varmistettu, esim. staattisin lujuuskokein. Näin etsittyjen murtoehtojen parametrien (kitkakulma ja koheesio/attractio) arvot ovat varsin suuria. Tämä johtaa ajatukseen, että kuormitusnopeus/-taajuus – tässä työssä kuormitustaajuus oli 5 Hz – nostaa näennäistä murtoehto, jopa toistokuormitetussa tapauksessa. Sitomattomilla, karkearakeisilla materiaaleilla ei katsota olevan viskoosia, kuormitusnopeuteen sidottua käyttäytymistä, mutta mitattujen lujuusarvojen perusteella on kuitenkin ilmeistä, että nopea toistokuormitus hidastaa murtoon johtavien muodonmuutostenkehittymistä.

Kapeilla teillä deformaation arvo voidaan kertoa luiskan kaltevuuden mukaan määräytyvällä korjauskertoimella ($\geq 1,0$).

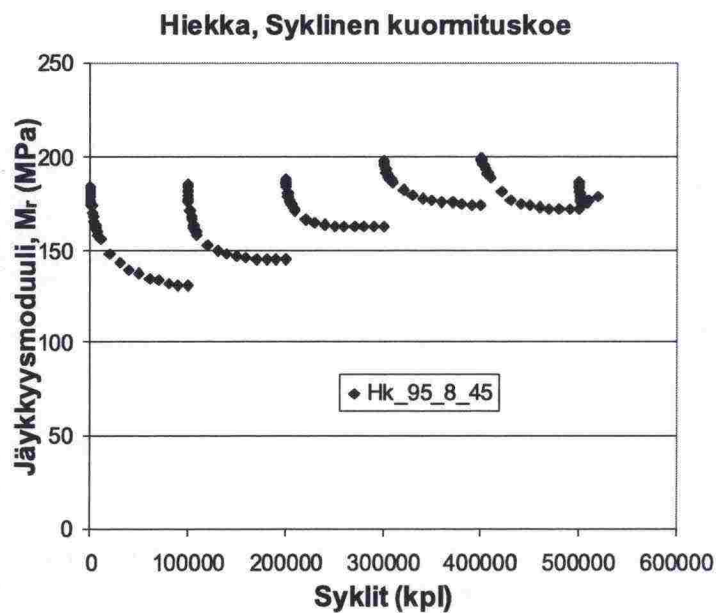


Kuva 4.6. Yksinkertaisen deformaatiomallin pystyjännityksen ja pysyvän muodonmuutoksen väliset yhteydet eri materiaalityypeillä. Tulos annettu 100 000 syklin kohdalla.

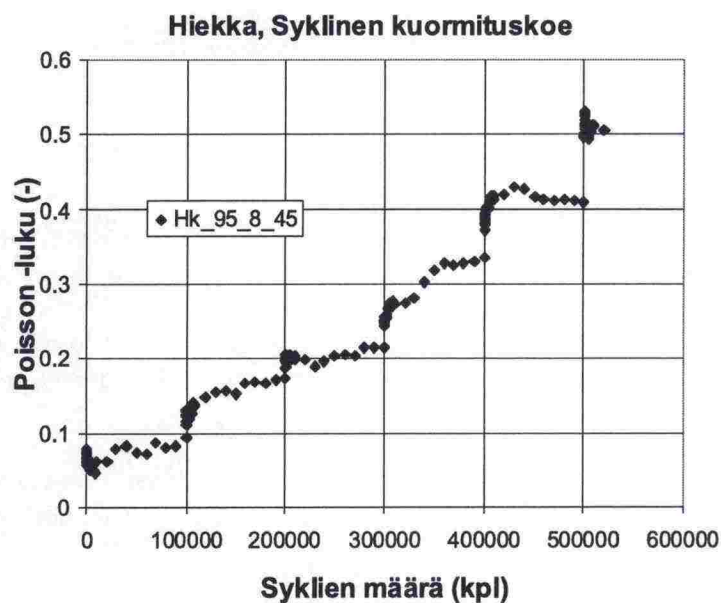
4.3 Jäykkyys ja Poisson -luku

Kuvissa 5.7 ja 5.8 on vertailun vuoksi esitetty tutkitun hiekan jäykkyys- ja Poisson -luku kuormitustason funktiona. Kuvissa on esitetty viiden eri kuormitustason tulokset. Kuvista nähdään, että jäykkyys kasvaa kuorman kasvaessa, mutta Poisson -luvun muutos on todella merkittävä jännityksen kasvaessa lähtötasolta kohti materiaalin murtotilaa.

Vastaava muutos Poisson -luvussa kuormitustason noustessa näkyi kaikilla materiaaleilla, ilmiö on myös todettu useissa muissa tutkimuksissa (Kolisoja 1997, Hoff 1999, Ekblad 2004).



Kuva 4.7. Jäykkyysmoduulin taso ja muuttuminen syklisessä kolmiakselikokeessa kuormitustason funktiona. Hieno hiekka, alkutiiveysaste 95 %, vesipitoisuus 8 %, sellipaine 45 kPa.



Kuva 4.8. Poisson-luvun taso ja muuttuminen syklisessä kolmiakselikokeessa kuormitustason funktiona. Hieno hiekka, alkutiiveysaste 95 %, vesipitoisuus 8 %, sellipaine 45 kPa.

4.4 ICT -kokeet

Tutkittujen materiaalien tiivistymisindeksi määritettiin ICT:llä ohjeen "ICT – koe tien rakennekerrosmateriaalien deformaatioherkkyyden määrittämisessä" (Jauhiainen & Törnqvist 2001) mukaisella menettelyllä. Kokeen tulokset on koottu taulukkoon 4.1. Rinnakkaismääritysten ero keskiarvoon oli enimmillään 3.2 %. Taulukkoon on myös sisällytetty ohjejulkaisun laadinnassa tehtyjen samojen materiaalien vastaavat arvot vertailun vuoksi. Poikkeama Teiskon kalliomurskeen arvoissa johtuneet eri materiaaleristä.

Taulukko 4.2. Tutkittujen materiaalien deformaatioindeksit ΔD – 2004 ja vuonna 2001.

Materiaali	Deformaatioindeksi ΔD (%) 2004	Deformaatioindeksi ΔD (%) 2001
Kalliomurske (Teisko)	1.48 ¹⁾	1.95 ²⁾
Kalliomurske (Voutila)	1.44 ¹⁾	-
Hiekkainen sora (HVS)	1.16 ¹⁾	1.16 ²⁾
Hieno hiekka (HVS)	1.57	1.44 ²⁾

1) Laskettu kahden toiston keskiarvona

2) Laskettu kahden vesipitoisuuden keskiarvona.

Luokitus edellä mainitun ohjeen mukaan (Jauhiainen & Törnqvist, 2001):

Materiaaliluokitus	Deformaatioindeksi ΔD
Erinomainen	< 1.25
Hyvä	1.25 – 1.40
Tyydyttävä	1.40 – 1.60
Huono	> 1.60

5 LASKENTATYÖKALU

5.1 Deformaation laskennan nykytilanne

Tällä hetkellä ei ole tiedossa kaupallista rakenteen deformaation määrittämenettelyä. Aihetta tutkitaan kuitenkin laajasti ympäri maailmaa ja jo lähitulevaisuudessa tulee varmasti olemaan saatavilla kaupallisiakin ohjelmia. Kaikkien ohjelmien käyttö edellyttää kuitenkin kansallisten materiaaliparametrien määrittystä ja paikallisten työtekniikoiden ja ilmasto-olosuhteiden käsittelyä määrittäessä tehtäessä.

5.2 Laskennan periaate ja lohkokaavio

VTT:ssä ohjelmoitiin projektin yhteydessä laskentatyökalu, jonka avulla voidaan testata kehitettyä deformaation arviointimenetelmää. (Ohjelmaa kutsutaan tässä työkaluksi, koska sitä ei viimeistelty ja testattu normaalin ohjelmankehitystyön edellyttämällä tarkkuudella ja laajuudella.)

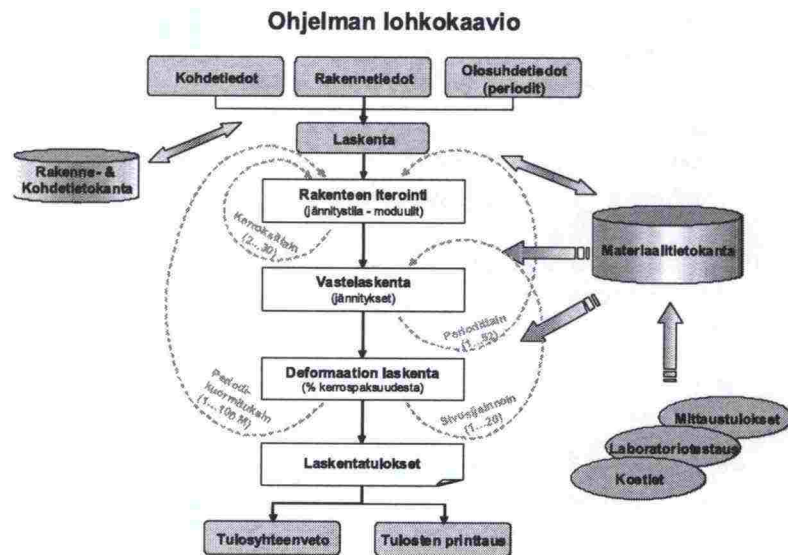
Deformaation laskennallinen arviointi perustuu liikennekuorman rakenteen eri kerroksiin aiheuttamien dynaamisten pystyjännitysten laskentaan. Pysyvä deformaatio lasketaan näiden jännitysten ja materiaaliakohtaisen deformaation käyttäytymisen avulla.

Laskentatyökalussa kuorman vaikutusta voidaan tarkastella muutaman erilaisella asetetun kuormitustyyppin avulla. Rakenne voidaan määrittellä kerroksittain, mutta tällä hetkellä käytettävissä on melko suppea materiaali- ja kuorma, joiden deformaatiokäyttäytyminen on selvitetty laboratoriotestein.

Yksittäinen liikkuvan ajoneuvon pyörä aiheuttaa rakenteessa kolmiulotteisen jännityspulssin, josta syntyy materiaaliin palautuvia ja pysyviä muodonmuutoksia. Pysyvien muodonmuutosten suuruus riippuu materiaaliin kohdistuvasta jännityspulssista, materiaalin tiiviyydestä, lujuudesta ja kosteudesta. Nämä tekijät on otettu deformaation laskentamenetelmään mukaan.

Suomen ilmasto-olosuhteissa tierakenteessa vallitsevat olosuhteet vaihtelevat selkeästi eri vuodenaikoina, joten laskentamenettelyssä katsottiin tarpeelliseksi käyttää ns. periodijaottelua. Tällöin vuosi jaetaan ajanjaksoihin, joiden aikana olosuhteet katsotaan pysyvän samoina tietyn ajan. Laskentatyökalussa voidaan määrittellä 1...60 eripituista periodia ja kullekin oma lämpötila- ja kosteusarvonsa.

Laskentatyökalun periaate on esitetty lohkokaaviossa (kuva 5.1). Työkalun käytöstä on laadittu oma ohjeensa (liite 7, Tierakenteen Deformaation Laskentatyökalun käyttöohje). Laskentatyökalun ja APAS-3:n erot vastelaskennassa on kuvattu liitteessä 8.



Kuva 5.1. Deformaation laskentatyökalun lohkokkaavio.

Luiskan huomioon ottaminen

Luiskan vaikutus deformaatioon otetaan huomioon kertomalla muiden tekijöiden tuottama deformaatio oheisesta kaavasta saadulla kertoimella, GEOM. Se soveltuu käytettäväksi, kun kuormituksen etäisyys luiskasta on 0.8 ... 2.5 m. Yhtälö on empiirinen ja perustuu HVS Kevytpäällystehankkeen koerakennuskohteen tuloksiin (Korkiala-Tanttu & al. 2002).

$$GEOM = 1 + \frac{0.86}{l^{1.454} \cdot 2.7^{N/3}}$$

missä N on luiskan kaltevuus (1:N)
 l kuormituksen (renkaan keskikohdan) etäisyys luiskasta (m)

Tiiviysalitus

Rakenteen tiivistyksen aikana materiaaliin, rakeisiin ja niiden kosketuspisteisiin kohdistuu voimakkaita normaali- ja leikkausvoimia. Yhdessä veden kitkaa ja/tai pintajännitystä alentavan vaikutuksen kanssa materiaali tiivistyy jyräyksen aikana. Tiivistystyö tehokkuus riippuu lisäksi tiivistyskalustosta, tiivistettävän kerroksen paksuudesta, materiaaliominaisuuksista ja alla olevien kerrosten jäykkyyksistä. Hyvin pehmeällä pohjalla tiivistys ei onnistu kunnolla vaikka työtä tehtäisiinkin muutoin riittävä määrä.

Rakennemateriaalin jälkitiivistyminen käsittää ajoneuvokuorman aiheuttaman tiivistymisen. Vastaavasti kuin jyräyksessä ajoneuvon aiheuttama jän-

nityspulssi kohdistaa rakeisiin normaali- ja leikkausjännityksiä. Nämä jännitykset yhdessä veden kanssa tiivistävät rakennetta. Liikenteen aiheuttama jälkitiivistyminen on merkittävää lähinnä löyhiksi jääneissä kerroksissa ja se on nopeinta alussa. Ajoneuvokuormituksen tiivistystehon ollessa selkeästi jyräystehoja pienempi voidaan olettaa, että jälkitiivistyminen löyhiksi jääneissä rakenteissa on vain osa toteutuneesta tiivistysvajesta.

Tiiveysalitus voidaan ottaa huomioon esimerkiksi kaavassa 5.1 esitetyllä tavalla. Muodonmuutos kuormituskerralla (N) lasketaan potenssifunktiosta (kaava 4.1).

$$\varepsilon_1^P = f(\sigma_1) + k \cdot \Delta D \quad (\%) \quad (5.1)$$

missä k on jälkitiivistymiskerroin, $k = 0 \dots 1$
 ΔD tiivistysalitus työselityksen arvoon nähden (%)

Tämän muodon ongelma on sen tuottama arvo kuormittamattomanakin. Kaavaa tulee korjata muotoon, jossa on mukana myös kuormituksen taso (esimerkiksi tiivistystyön aikaiseen jännitykseen skaalattuna).

Toinen vaihtoehto, jota on käytetty laskettaessa esimerkkirakenteita, on muotoa (kaava 5.2). Eksponentin C arvo määrätään sopivaksi.

$$\varepsilon_1^P = (1 / (D_{tot}/D_{tav}))^C \cdot f(\sigma_1) \quad (\%) \quad (5.2)$$

missä D_{tav} on tavoitetiiveysaste työselityksen mukaan (%)
 D_{tot} Toteutunut tiiveysaste (%)
C eksponentti

Routa ja painumat

Routaantuminen ja routiminen sekä epätasainen painuminen löyhdyttävät rakennetta sekä toistuvasti että jatkuvasti. Löyhtymisestä seuraa kumuloituva urautuminen. Tätä asiaa ei ole vielä huomioitu laskentatyökalussa.

5.3 Työkalun ominaisuudet

Laskentatyökalussa kuorman aiheuttamat vasteet – kuten jännitykset – rakenteessa lasketaan menetelmää varten modifioidulla monikerrosmallilla (STRESS). Kuten lohkokaaviosta käy ilmi, vastelaskenta muodostaa vain pienen osuuden työkalukokonaisuudesta. Projektissa on laadittu lukuisia toimintoja, jotka mahdollistavat vastelaskennassa hyödynnettävät erityisominaisuudet.

STRESS-ohjelmalla voidaan käsitellä rakenteita kerroksittain. Kullekin kerrokselle annetaan parametreina paksuus, jäykkyysmoduuli ja Poisson-luku.

Vastelaskenta perustuu seuraaviin oletuksiin:

- rakenne koostuu tasapaksuista, homogeenisista, vaakasuunnassa äärettömistä kerroksista (luiskat otetaan huomioon vasta deformaation laskennassa)
- rakennekerrokset käyttäytyvät kimmoisesti ja niiden jännitys-muodonmuutossuhde on lineaarinen
- pohjamaa on ääretön vaakasuunnassa ja alaspäin
- laskennassa rakenteet oletetaan isotrooppisiksi.

Kuorma annetaan STRESS-ohjelmalle ympyränmuotoiselle pinnalle tasaisesti jakautuneena jännityksenä. Kuormitus voi koostua yhdestä tai useammasta tällaisesta pinnasta. Laskentatyökalussa käytetty kuormitus voidaan valita muutamasta ennalta määritellystä kuormitustyyppistä (standardiakseli, supersingle, henkilöautorengas), joissa kuormitus on mallinnettu valmiiksi sopivien ympyräpintojen avulla. Oletuskuormituksena käytetään standardiakselia, joka vastaa mitoitustarkasteluissa käytettyä suomalaista standardikuormitusta.

Rakenne voi sisältää 1...30 materiaalikerrosta. Kunkin rakennekerroksen materiaali valitaan työkaluun sisältyvästä tietokannasta. Materiaalivalinta asettaa kunkin materiaalin laskentaparametreille tietokannassa olevat oletusarvot. Käyttäjä voi muuttaa omiin rakenteisiinsa sisällyttämien materiaalien keskeisimpien parametrien arvoja. Tietokantaa voi editoida tietokantaeditoreilla (esim. MS Access).

Eräät laskentaparametrit – kuten materiaalin jäykkyysmoduuli – annetaan ohjelmalle funktion avulla, jossa riippuvuus esim. lämpötilan suhteen ilmaistaan matemaattisen muuttujan avulla.

Työkalun periodimäärittely tehdään taulukoiden avulla. Perioditaulukossa määritellään periodien lukumäärä ja kunkin periodin pituus, lämpötila ja kosteustila. Lisäksi yksi periodi merkitään referenssiperiodiksi, jonka suhteen voidaan haluttaessa määrittää muiden periodien parametriarvoja.

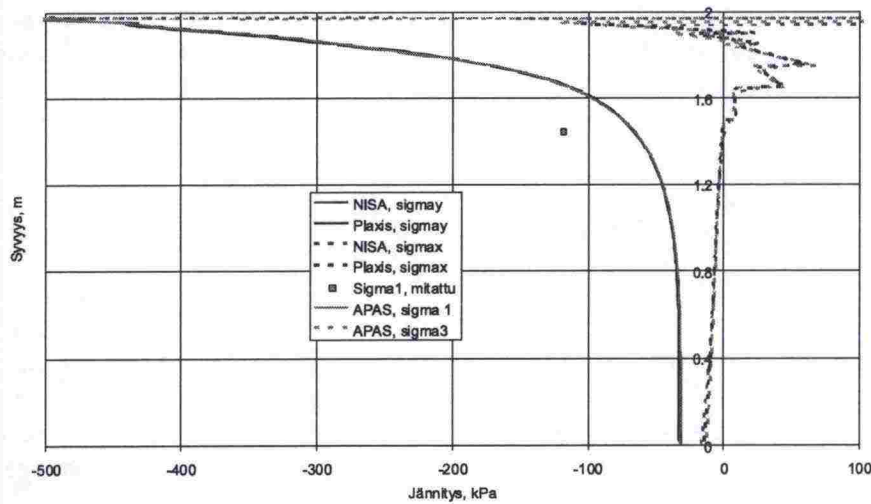
Ratkaisumenetelmien vertailu

Tutkimuksessa verrattiin myös elementtimenetelmillä laskettuja jännitystiloja elastisen monikerrosmallin (APAS / STRESS) tuloksiin. Elastisen ratkaisun tulokset olivat identtisiä (kuva 5.2). Kuvassa vertaillaan jännityksiä suoraan kuorman alla, joten pääjännitys σ_1 vastaa pystysuuntaista jännitystä σ_y ja pääjännitys σ_3 vaakajännitystä σ_x .

Eroja tuloksiin tuli vasta, kun pyrittiin poistamaan vetojännitykset (positiiviset σ_x tai σ_3 jännitykset) sitomattomista materiaalikerroksista, mikä ei ole mahdollista kimmoisilla materiaaleille. Vertailu tehtiin soveltamalla Plaxis- ja Nisa - ohjelmissa kimmoplastista materiaalmallia. Vertailuista ohjelmista vain Plaxis pystyi poistamaan (tai jakamaan uudelleen) vetojännitykset, NISA -ohjelma rajoitti vetojännitykset lähes merkityksettömiksi ja työkalussa käytetty jännitysten laskentamenettely nollasi kaikki sitomatto-

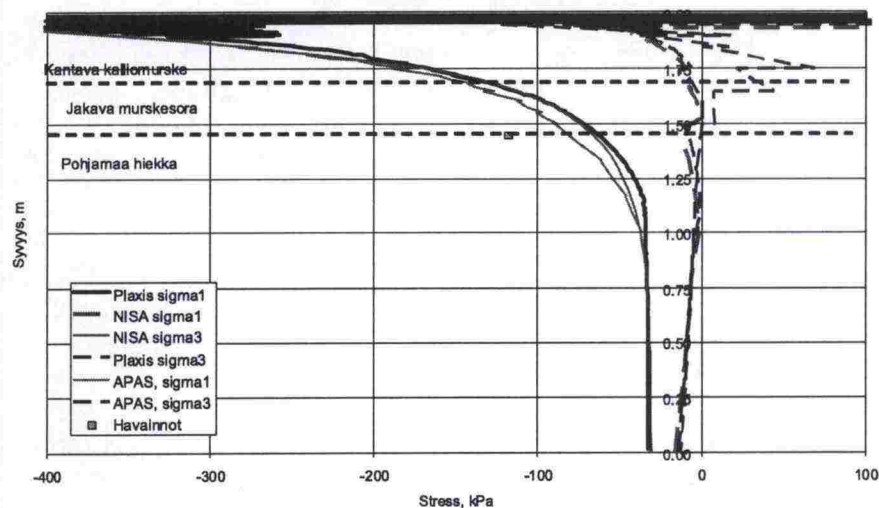
mien kerrosten vetojännitykset (kuva 5.3). Vertailun jälkeen, koska jännitykset eri menetelmillä vastasivat riittävän tarkasti tässä kehitysvaiheessa toisiaan – päätettiin, että tarkempia vertailuja ei tarvitse tehdä. Valittu laskentaohjelma on siis APAS:in Stress -ohjelma, jossa käytetään epälineaarista elastista materiaaalimallia. Laskennassa kehittyneet vetojännitykset nollataan.

Lineaarisesti elastinen materiaaalimalli, kuormitus 557 kPa



Kuva 5.2. Lineaarisesti elastisen ratkaisun mukaiset pääjännitykset (σ_1 , σ_3) suoraan kuorman alla eri ohjelmilla laskettuina.

Mohr - Coulomb, kuorma 557 kPa



Kuva 5.3. Kimmoplastisen ratkaisun (Nisa ja Plaxis) mukaiset pääjännitykset (σ_1 , σ_3) suoraan kuorman alla verrattuna APAS-ohjelmalla laskettuihin.

5.4 Työkalun lähtötietovaatimukset

Arvioidakseen tietyn kohteen rakenteessa syntyvää deformaatiota, käyttäjän on annettava laskentatyökalulle tietoja kohteesta, rakenteesta ja laskennassa käytettävästä periodijaottelusta.

Kohteesta on tiedettävä (tai arvioitava) liikennemäärät ja liikenteen poikittaishajonta ja nopeus (kuva 5.4). Koska deformaatio lasketaan vain yhdelle akselistotyyppille – tyypillisesti standardiakselille – on kaikki erilaiset ajoneuvoakselistot ilmaistava valitun akselistotyypin avulla. Työkalussa on mahdollisuus käyttää kertoimia, joilla keskivuorokausiliikenteestä, KVL:stä voidaan laskea standardiakselien lukumäärä. Kohteen ilmasto- ja sääolot määritellään periodijaottelun avulla.

Tarkastelu aika asetetaan vuosina ja se on käyttäjän valittavissa.

Kohteen liikennetiedot

Laskentakuorma:	Standardiakseli		
KVL tarkastelun alku:	5000	KVL tarkastelun loppu:	5000
Tarkastelu aika (v):	1	Vuotuinen kasvu %:	0
Laskentasuomien % osuus:	10	Tien leveyskerroin:	1
Tarkasteluajan kuormituskerat:	401500	Kuorman vastaavuuskerroin:	2.2
Liikenteen nopeus (1-100 km/h):	50		

Kuormitusten poikittaishajonta:

Hajonnan kokonaisleveys [cm]: 100

Kuva 5.4. Kohdetietojen syöttölomake.

Rakenne määritellään kerroksittain (kuva 5.5). Kullekin kerrokselle valitaan materiaali listalta, jonka ohjelma muodostaa tietokantansa perusteella. Materiaalivalinta asettaa samalla oletusarvot materiaaliparametreille, joista käyttäjä voi muuttaa paksuutta, Poisson-lukua, moduulia, tiiviysastetta ja deformaatiomallia. Pohjamaasta syötetään paksuutta lukuun ottamatta vastaavat tiedot.

Työkalulla on mahdollisuus tarkastella myös vaiheittainrakentamisen merkitystä deformaantumiseen. Kun käyttäjä asettaa vaiheittain rakennetun uuden päällysteen materiaalityypin ja rakennusajankohdan, ohjelma ottaa ne laskennassa huomioon.

	Nimi	Paksuus (m)	Poisson	Moduuli	Tiivys-Optimi (%)	Deformoituminen
1	ABK(B80)	0.100	0.35	$(-0.0115 \cdot T^4 + 0.799$	0	
2	KaM_Defo	0.200	0.35	$K1 \cdot (S/160)^{K2}$	0	$0.0491 \cdot \exp(0.0042 \cdot si) - 0.4$
3	HkSr_Defo	0.250	0.35	$K1 \cdot (S/160)^{K2}$	0	$0.0241 \cdot \exp(0.0088 \cdot si) - 0.4$
4	HVS_Hk_Defo	1.500	0.35	$K1 \cdot (S/160)^{K2}$	0	$0.019 \cdot \exp(0.0144 \cdot si) - 0.0$

Pohjamaa:

Sa stress_D	0.35	$5 \cdot K1 \cdot S^{K2}$	0	$0.0000696 \cdot si^2 + 0.00727$
-------------	------	---------------------------	---	----------------------------------

Uusi päällyste:

SMA(B80)	0.04	0.35	$(-0.00643 \cdot T^4 + 543$	0	
----------	------	------	-----------------------------	---	--

Päällystys_Vuosi: 2
Päällystys_Periodi: Kesä

Kuva 5.5. Rakenteen määrittelylomake.

Periodimäärittely sisältää aikajaksottelun ja kunkin jakson lämpötila- ja kosteusarvon asettamisen (kuva 5.6). Lämpötilaa ja kosteutta voidaan käyttää muuttujina moduuli- ja deformoitumisfunktioissa.

Jäykkyysmoduulia ei välttämättä voi kuvata oikein pelkästään lämpötilan ja kosteuden avulla, kuten esim. talvella jäätyneen maakerroksen osalta. Tällaisia tilanteita varten työkalu tarjoaa mahdollisuuden määrittellä moduuli-arvo periodeittain kiinteästi tiettyyn arvoon tai suhteessa tiettyyn referenssitasoon.

Tarkemmat ohjeet lähtötietojen asettamisesta ja käytöstä löytyvät liitteestä 7 (Tierakenteen Deformaation Laskentatyökalu, Käyttöohje).

	1	2	3	4	5	6	7
Nimi	Talvi	Kevät	RoutaSula	Kesä	Syksy	LoppuSyksy	Keskim
Pituus (d)	140	30	20	100	45	30	365.0
Pituus (%)	38.4	8.2	5.5	27.4	12.3	8.2	100.0
Lämpö (°C)	-5	3	10	20	10	5	6.0
Kosteus (%)	3.0	4.0	5.0	3.0	4.0	4.5	3.4
Referenssi				X			
Eka_Periodi	X						

	Päivä						
Moduulit periodittain (MPa)							
AB(B80)	12263	9548	6688	3311	6688	8744	8333
KaM_Defo	*5	*0.8	*0.6	269	265	263	0
HkSr_Defo	*10	*1	*0.5	119	118	*0.9	0
HVS_Hk_D	*15	*2	*0.5	54	*0.9	*0.9	0
Sa stress	*20	*10	*0.4	71	*0.9	*0.8	5

Kuva 5.6. Periodin määrittelylomake.

5.5 Vaihtoehtoiset ratkaisumenetelmät

Kokeellisen tutkimuksen aikana kävi selvästi ilmi, että kaikkien tutkittujen materiaalien pysyvä muodonmuutos oli selvästi sidottu jännityspolun maksimijännityksen etäisyyteen murtosuorasta (murtoehto). Tässä yhteydessä murtoehto on oletettu suoraviivaiseksi kaikissa koordinaatistoissa ($\sigma_3 - \tau$ tai $p - q$). Attraktio a määrittää kussakin koordinaatistossa vaaka-akselin arvon kun $\tau = 0$ tai $q = 0$ (kuva 5.7).

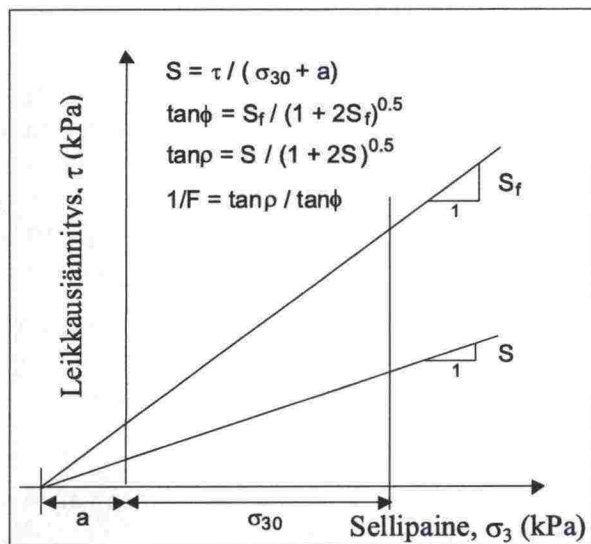
Tämän huomion johdosta tulokset piirrettiin myös mobilisaatioasteen S_m suhteen q/p -koordinaatistossa. Vaihtoehtoisikin mobilisaatioasteen määritelmiä löytyy. Horvli (1979) kuvaa väitöskirjassaan yhden (kuva 5.7) ja Hoff (1999) vastaavasti toisen määritelmän (kuva 5.8).

Pysyvän muodonmuutoksen ja mobilisaatioasteen välisen vuorosuhteen voi havaita esim. hiekan (kuva 5.9) tai kalliomurskeen (kuva 5.10) koetuloksista. Kuvista voi todeta, että tutkittuihin materiaaleihin alkoi kehittyä erittäin merkittävää pysyvää muodonmuutosta, kun mobilisaatioaste lähestyy ja ylittää 80 % materiaalin lujuuskapasiteetista.

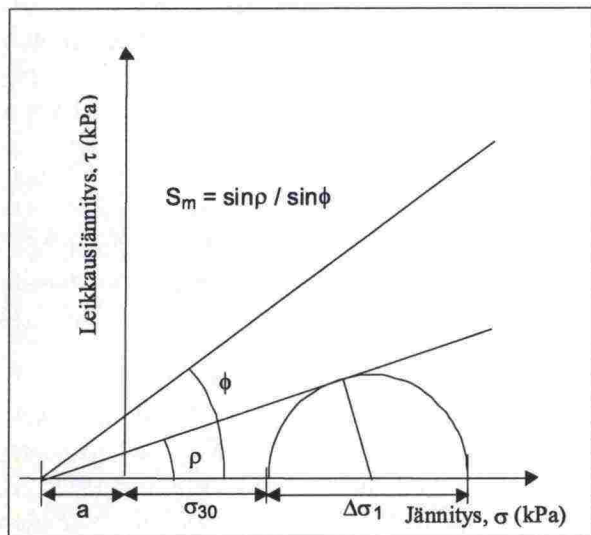
Mobilisaatioasteen määrittäminen ei ole täysin tarkka, koska staattinen lujuus on määritetty koetulosten perusteella olettaen, että se on vähintäänkin yhtä suuri tai hieman suurempi kuin näytteen kestävästä syklisestä kuormituksesta laskettu laskennallinen lujuus. Erillisiä staattisia – hitaita tai nopeita – lujuuskokeita ei ole tehty tutkittujen materiaalien tiiveys ja kosteustiloissa. HVS –kokeissa tehdyt staattiset lujuuskokeet tehtiin alemmissa tiiveystiloissa.

Mobilisaatioaste tarkoittaa tässä tutkimuksessa tarkasteltavan jännityspisteen ja attraktio –pisteen (a) kautta kulkevan suoran kaltevuutta suhteessa murtosuoran kaltevuuteen. Suhteen määrittäminen vaihtelee eri lähteissä (Horvli 1979, Hoff 1999).

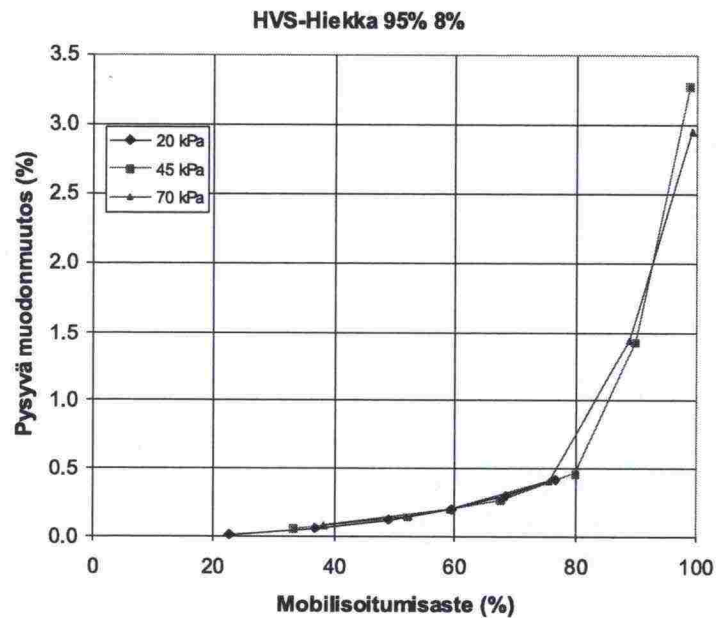
Eräät tutkijat, kuten Lekarp (1999) ovat kyseenalaistaneet staattisen leikkauslujuuden soveltamisen plastisten muodonmuutosten määrittämisessä. Tässä työssä on kuitenkin oletettu, että plastisilla muodonmuutoksilla on selkeä korrelaatio staattisiin lujuusominaisuuksiin määritettyinä oikeassa jännitys- ja tiiveystilassa.



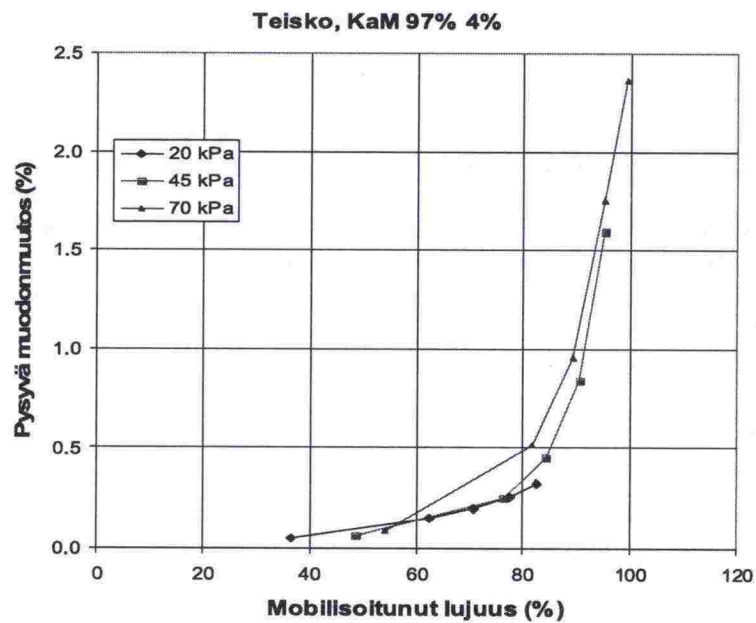
Kuva 5.7. Mobilisaatioasteen ($1/F$) määrittysperiaate (Horvli 1979). Kulmakerroin S_f esittää murtosuoraa ja kulmakerroin S määrittää kulloisenkin jännityspisteen määrittämän suoran kaltevuuden.



Kuva 5.8. Mobilisaatioasteen (S_m) määrittysperiaate (Hoff 1999).



Kuva 5.9. Pysyvän muodonmuutoksen ja mobilisaatioasteen yhteys HVS - hiekalla. Hieno hiekka, alkutiiveysaste 95 % ja vesipitoisuus 8 %.



Kuva 5.10. Pysyvän muodonmuutoksen ja mobilisaatioasteen välinen yhteys kalliomurskeella (Teisko). Alkutiiveysaste 97 % ja vesipitoisuus 4 %.

5.6 Laskentatyökalun ensimmäinen versio

Laskentatyökalun ensimmäisen version ominaisuudet ovat:

- APAS –yhteensopivat rakenne- ja materiaaliparametrit
- Vuodenajat (lämpö- ja kosteustila) mukaantuova periodijako. Lämpötilan vaikutus APAS –moduulifunktioista ja kosteuden vaikutus kerroinmenettelyllä.
- Kerroksellinen, epälineaarisesti elastinen monikerrosmalli jännitysten laskuun käyttäen APAS –moduulifunktioita ja tiiveyden mukaan muuttuvia jäykkyysmoduuleja.
- Materiaalitietokannassa on tiedot saven, siltin, hiekan, soran ja kalliomurskeen tyypillisistä deformaatio-ominaisuuksista. Valtaosa näistä malleista perustuu tässä tutkimuksessa tehtyihin laboratoriotutkimuksiin.
- Sidotun päällysteen malli perustuu olettamukselle Dynaamisen Creep –kokeen käytöstä. Stabiloitujen materiaalien materiaalimalleja tietokannassa ei vielä ole lainkaan.
- Tiiveyden vaikutusta ei ole vielä kattavasti otettu osaksi materiaalimalleja. Ensimmäisessä versiossa tiiveys otetaan huomioon kerroinmenettelyllä. Menettelyn tavoitteena on muuttaa tiiviystason alitus osittain deformaatioksi. Tiiveyden vaikutus voidaan mallintaa kahta tietä: Ensimmäisessä tiiveys mallinnetaan tekemällä kokeet eri tiiviyksissä ja valitsemalla aina laskentamalli tiiveyden mukaan, toisessa menettelyssä lujuustason (mobilisaatioaste) ja pysyvän muodonmuutoksen yhteys oletetaan tiiveydestä riippumattomaksi ja tiiveydellä korjataan mallin lujuusparametrejä. Jälkimmäinen tapa lienee teoreettisesti oikeampi.

Laskentatyökalu on rakenteeltaan avoin. Sen osia voidaan tarkentaa yhdessä tai erikseen. Jännitys- ja muodonmuutostilan ratkaisumenetelmät ovat räätälöitävissä karttuvien mittaus- ja materiaalitietojen mukaisesti.

Laskentatyökalua voidaan käyttää:

- Deformaation määrän ja paikan arvioimiseen. Rakenteen deformaatiokestävyyden laskennallisessa osoittamisessa sen jälkeen, kun mallien ja menettelyjen toiminta on todennettu.
- Rakenteen materiaalien ja kerrospaksuuksien optimointiin. Urakoitsija voi valita rakennekerrosten materiaalit deformaatio-ominaisuuksien perusteella ja mitoittaa riittävät kerrospaksuudet. Urakoitsijalle ja suunnittelijalle syntyy näkemys deformaatioon vaikuttavista tekijöistä.

5.7 Periodijako- ja parametriarvosuositus

Työkalun kehitysvaiheessa tehtyjen koelaskentojen aikana päädyttiin käyttämään seitsemää periodia. Niiden avulla voidaan Suomessa esiintyvät lämpötila- ja kosteusvaihtelut määritellä melko edustavasti. Toisaalta ohjelman nykyisellä versiolla "seitsenkertainen" laskenta ei vaadi kohtuuttomasti PC-resursseja eikä laskentaprosessin viiveet vielä sanottavammin "kylästyttä" käyttäjää.

Jaettaessa vuosi periodeihin suosituksen mukaisesti kerrosten materiaalien moduuliarvot määräytyisivät taulukossa 5.1 esitettyjen periaatteiden pohjalta. Taulukko perustuu pitkälti kirjallisuuslähteeseen: Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet (Ehrola 1996).

Taulukko 5.3. Suositus periodijaon pohjaksi ja jäykkyysmoduulien määräytymiselle kussakin periodissa.

	1 Talvi	2 Kevät	3 RoutaSula	4 Kesä	5 Helle	6 Syksy	7 MyöhSyksy
Pituus (vko) esim (d)	15 - 25 150	3 - 7 30	2 - 4 15	10 - 17 95	1 5	2 - 5 30	2 - 4 30
Kosteusero (%)	0	1	3	0	0	1	2
Päällyste Sidottu kantava	Lämpöt.riipp. Lämpö & jänn	Lämpöt.riipp. Lämpö & jänn	Lämpöt.riipp. Lämpö & jänn	Lämpöt.riipp. Lämpö & jänn	Lämpöt.riipp. Lämpö & jänn	Lämpöt.riipp. Lämpö & jänn	Lämpöt.riipp. Lämpö & jänn
Sitomaton kantava	E • (5 - 10)	E • (0.8 - 0.9)	E • (0.6 - 0.9)	Jännit.riippuva	Jännit.riippuva	Jännit.riippuva	Jännit.riippuva
Sitomaton	E • (5 - 15)	E • (0.8 - 1.2)	E • (0.5 - 0.8)	Jännit.riippuva	Jännit.riippuva	Jännit.riippuva	E • (0.8 - 1.0)
Pohjamaa	E • (5 - 20)	E • (2 - 10)	E • (0.4 - 0.7)	Jännit.riippuva	Jännit.riippuva	E • (0.9 - 1.0)	E • (0.7 - 0.9)

Bitumilla sidotun päällysteen jäykkyysmoduuli on asetettu ympäri vuoden lämpötilariippuvaksi. Sidotut kantavat kerrokset voivat olla materiaalista riippuen joko lämpö- ja/tai jännitystilariippuvia.

Merkintään "E•" liittyvä numeroarvo taulukossa ilmaisee kyseisen periodin moduuliarvon suhdetta materiaalin referenssiperiodin moduuliin. Referenssiperiodiksi on asetettu kesän "luonnolliset" olosuhteet. Kesä-periodissa kaikkien sitomattomien kerrosten moduulit lasketaan jännitystilariippuvina. Tätä referenssimoduulia käytetään lähtöarvona laskettaessa niiden periodien moduulia, joille se on asetettu suhdelukuna referenssiperiodiin.

Sitomattomien osalta on syytä tarkoin harkita routa-aikaan sijoittuvien moduulien käyttöä niin, että ne vastaisivat kuvitellun kohteen olosuhteita. Taulukossa näille periodeille on jätetty vielä melko suuri vaihteluväli.

Tutkimuksessa tehtyjen laskelmien perusteella talvella näyttäisi olevan hyvin pieni merkitys mitoitusluoksissa, mutta se on silti otettu mukaan omana periodinaan jo siksi, että Suomen talven olosuhteet maan eri osissa poikkeavat melkoisesti toisistaan.

5.8 Laskentatyökalun käyttöympäristö

Laskentatyökalu on ohjelmoitu Windows-käyttöympäristöön. Se voidaan asentaa kaikkiin Windows NT ja tätä uudempiin käyttöympäristöihin. Koska ohjelma on kuitenkin työkaluluontoinen (viimeisteleminen) ja se vaatii ras-kaan laskentatarpeen vuoksi melko tehokkaan tietokoneen, VTT asettaa sen etäkäyttöön extranet-palvelimeltaan ilman varsinaisia asennustoimin- toja. Laskentatyökalu on palvelimella toistaiseksi.

VTT:n Extranet-palvelimen käyttöjärjestelmänä on Microsoft Windows 2000 Server, joka mahdollistaa ohjelman ajamisen www-yhteyden läpi millä ta- hansa mikrotietokoneella. Tällaisessa etäkäyttökoneessa tarvitsee olla vain Terminal Services Remote Desktop -ohjelma, joka sisältyy valmiiksi esim. Windows XP käyttöjärjestelmään. Muihin käyttöjärjestelmiin (Windows 95 lähtien) sen voi ladata ilmaiseksi Microsoftin www-palvelusta (<http://www.microsoft.com/downloads>). Remote Desktop on pieni pääte- emulointiohjelma Terminal Services -palvelujen käyttöön ja jolla yhteys pal- velimeen muodostetaan. Palvelu välittää etäkoneeseen ainoastaan palve- limen näytön, joten etäkäyttökoneen tehokkuusvaatimus on varsin pieni.

Työasemaohjelman lisäksi etäkäyttäjä tarvitsee käyttäjätunnuksen VTT:n Terminal Services -palvelimeen. Tunnuksen ohella käyttäjän työasemalle pitää sallia pääsy VTT:n ulkoisen verkkorajapinnan palomuurin läpi ekstra- net -verkkoalueelle etäkäyttöä varten.

Etäkäytön tarkemmat ohjeet on esitetty liitteessä 7 (Tierakenteen Defor- maation Laskentatyökalu, Käyttöohje).

5.9 Esimerkilaskelmat

Laskentatyökalun toimintaa on esitetty alla kahden esimerkin avulla. Ensimmäinen esimerkki perustuu HVS -kokeeseen, joka teki VTI (Väg- och trans- portforskningsinstitutet) Linköpingissä Ruotsissa. Toinen laskentaesimerkki on "RAKSU" -rakenne, esimerkki alempiluokkaisesta tiestä.

Esimerkki 1.

HVS -kokeen sidotut ja sitomattomat rakennekerrokset olivat yhteensä 350 mm ja sen alla oli 2500 mm hienoa hiekkaa. Materiaalit vastasivat melko hyvin tässä hankkeessa tutkittuja materiaaleja (KaM (Teisko), hkSr, hHk). Myös eri kerrosten kosteudet sekä tiiveydet vastasivat riittävän hyvin tutki- muksen vastaavia tilasuureita. Kuorma aiheutettiin paripyörällä ja kuorman suuruus oli 60 kN. Kuvissa 5.11 – 5.12 on esitetty tiedot rakenteesta, perio- deista ja materiaaliparameteristä. Kuvassa 5.13 on lopuksi esitetty lasken- nan tulos – deformaation kehitymis- ja summakäyrä.

	Nimi	Paksuus (m)	Poisson	Moduuli	Tiiviysoptimi (%)	Tyypill. kosteus (%)	Rakenne kosteus (%)	Deformaatiomalli
1	AB(B80)	0.050	0.35	$(16000/[E \cdot P \cdot ((T-7)/9)+1]) \cdot 500 \cdot (0.203$				
2	AB(B80)	0.060	0.35	$(16000/[E \cdot P \cdot ((T-7)/9)+1]) \cdot 500 \cdot (0.203$	0			
3	KaM_teisko	0.105	0.35	$K1 \cdot (S/160)^{1/2} \cdot K2$	0	4	4	$0.48 \cdot si / (338 \cdot si) + 1$
4	HkSr_Defo	0.145	0.35	$K1 \cdot (S/160)^{1/2} \cdot K2$	0	4	4.5	$0.34 \cdot si / (171 \cdot si)$
5	Hk_Defo	1.000	0.35	$K1 \cdot (S/160)^{1/2} \cdot K2$	0	8	8	$0.22 \cdot si / (113 \cdot si)$
6	Hk_Defo	1.500	0.35	$K1 \cdot (S/160)^{1/2} \cdot K2$	0	8	8	$0.22 \cdot si / (113 \cdot si)$

Kuva 5.11. HVS -rakenne SE06. Rakenne-, tila- ja deformaatiomallin tiedot.

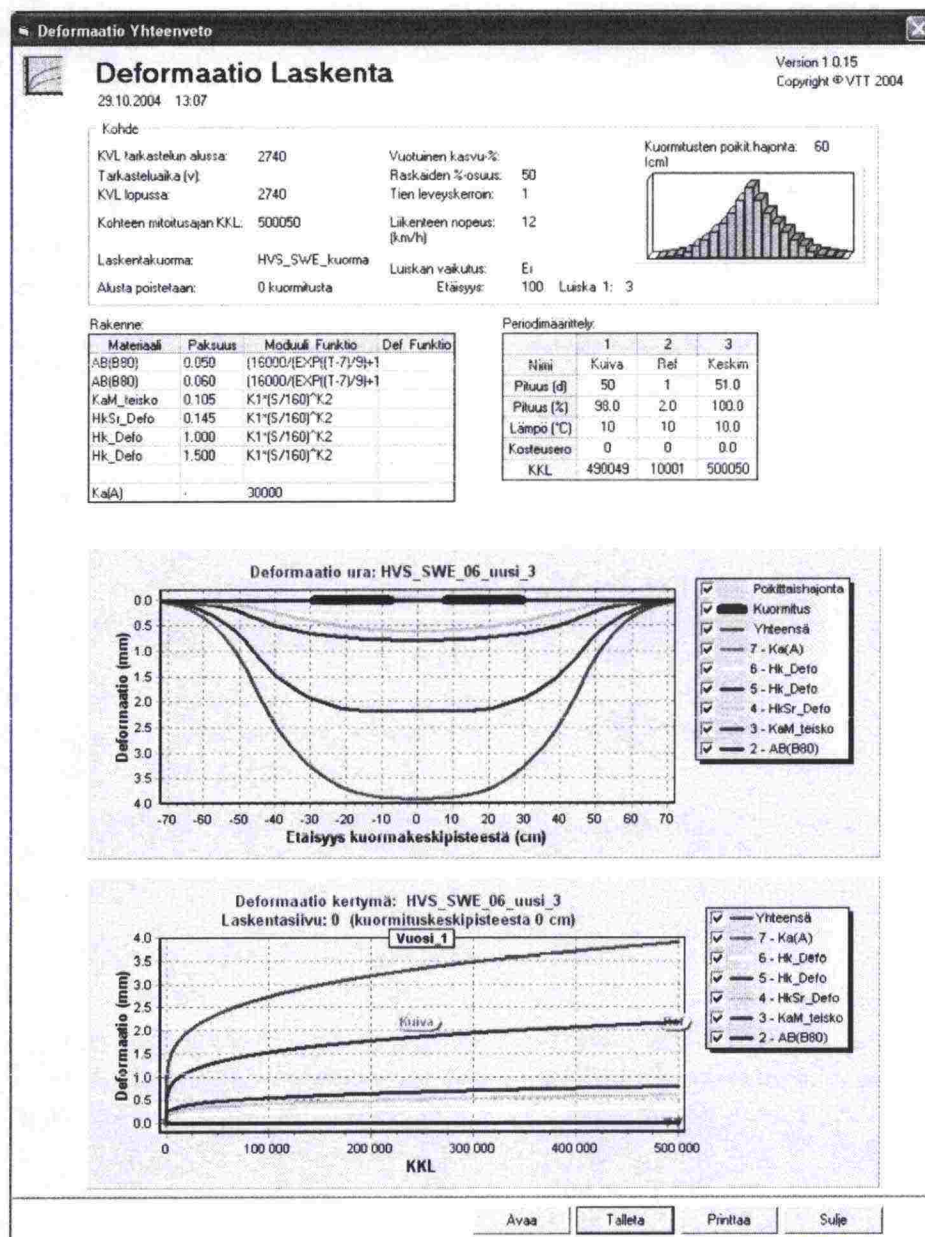
	1	2	3
Nimi	Kuiva	Ref	Keskim
Pituus (d)	50	1	51.0
Pituus (%)	98.0	2.0	100.0
Lämpö (°C)	10	10	10.0
Kosteusero (%)	0	0	0.0
Referenssi		X	
Eka_Periodi	X		

Moduulit periodittain (MPa)			
AB(B80)	E=3500	3839	3839
AB(B80)	E=3000	3839	3839
KaM teisko	256	254	0
HkSr Defo	124	123	0
Hk Defo	53	53	0
Hk Defo	61	61	0
Ka(A)	30000	30000	30000

Kuva 5.12. HVS -rakenne SE06. Periodi- ja materiaalitiedot.

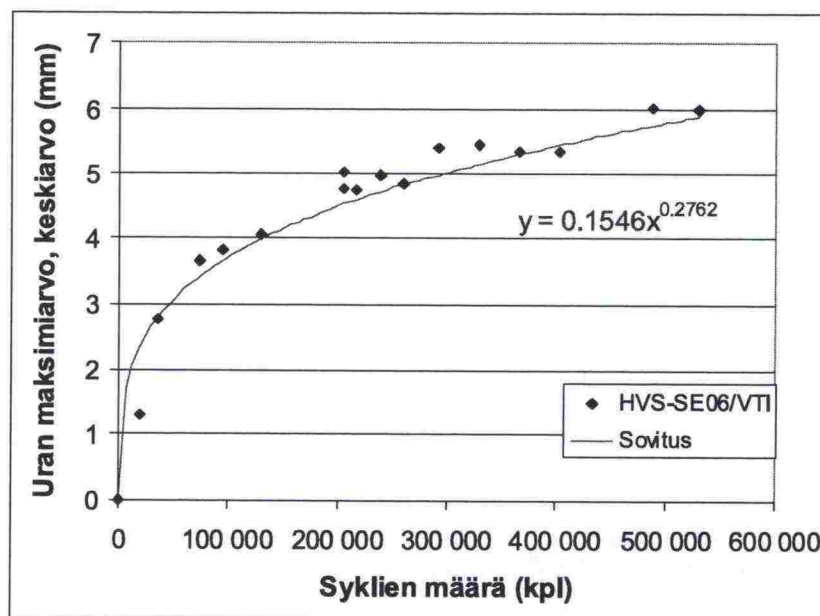
Deformaatio on laskettu ensimmäisen 500 000 syklin osalta, jolloin hiekka oli kuivempaa – vesipitoisuus oli n. 10 %. Tämän jälkeen hiekka kostutettiin (kyllästettiin) alhaalta ylöspäin 300 mm päähän hiekan yläpinnasta. Mallinnetun kuormitusjakson alkuun kuului 20 000 syklin esikuormitusjakso puolella kuormalla (30 kN) ja lisäksi 16 000 syklin vastemittausjakso neljällä eri kuormalla, joista suurin oli 80 kN. Tämä vaikeuttaa deformaation mallinnusta työkalun avulla. Esimerkissä näitä osuuksia ei ole otettu huomioon mitenkään, vaan ne on oletettu normaaleiksi kuormitusylikkeiksi.

HVS -kokeessa havaittu sitomattomien kerrosten kokonaisdeformaatio on esitetty kuvassa 5.14. Rakenteen eri kerrosten deformaatiot on mitattu "emu-coileja" käyttäen ja summattu yhteen kolmessa eri poikkileikkauksessa. Kuvassa 5.14 on esitetty kolmen poikkileikkauksen keskiarvo. Kuvaan on lisäksi piirretty sovitettu potenssifunktio osoittamaan, miten hyvin se sopii urautumisen mallintamiseen. Suurin ero tuloksessa ja sovituksessa on ensimmäisten 20 000 syklin sisällä alueella, jossa kuorma vaihteli eniten.



Kuva 5.13. HVS -rakenne SE06. Laskentatulokset, deformaation summa- ja nopeuskuvaajat. Käyttöliittymä sisältää tiedot liikennemäärästä (KVL), liikenteen nopeudesta, liikenteen kasvusta, kuorman poikkisuuntaisesta jakautumisesta, luiskan huomioimisesta, rakennepaksuuksista, jännitysten laskentaan tarvittavista jäykyyksistä ja deformaation määrittämisfunktioista sekä periodijaosta. Kuvissa on havainnollistettu deformaation kehittyminen summakuvaajana ja kerroskohtaisesti kuormituskertaluvun (ajan) mukana sekä ennuste uran poikkisuuntaisesta muodosta.

Laskentatyökalun ennustama deformaation arvo on noin 3.9 mm. HVS – kokeessa mitattu arvo on puolestaan noin 6.0 mm. Myös deformaatioiden kehittymisnopeudet eroavat toisistaan. Osasyys jälkimmäiseen on työkalun potenssifunktion eksponentin arvo, jolle on oletettu vakioarvo (0.25).



Kuva 5.14. HVS -rakenne SE06. Sitomattomien kerrosten mitattu urautuminen. Kolmen poikkileikkauksen kokonaisuran keskiarvo. Tulokseen sovitettu potenssifunktio havainnollistaa funktion soveltuvuutta mallinnustarkoituksiin.

Esimerkki 2.

Toinen laskentaesimerkki – RAKSU, luokka 4, pohjamaaluokka D – on esitetty kuvissa 5.15 – 5.17. Rakennekerrosten kokonaispaksuus, hiekka mukaanlukien on 550 mm. Myös pohjamaa on hiekkaa. Päälyste on 50 mm:n AB. Laskentakuorma on standardiakseli. Tässä rakenteessa on otettu huomioon myös luiskan vaikutus kokonaisuraan.

	Nimi	Paksuus (m)	Poisson	Moduuli	Tiiviysoptimi (%)	Tyypill. kosteus (%)	Rakenne kosteus (%)	Deformaatiomalli
1	AB(B80)	0.050	0.35	$(16000/[E \cdot P((T-7)/9)+1]+500) \cdot [0.203 \cdot$				
2	KaM_Leisko	0.200	0.35	$K1 \cdot (S/160)^{K2}$	0	4	4	$0.48 \cdot su/[338 \cdot si]+1$
3	HkSr_Defo	0.150	0.35	$K1 \cdot (S/160)^{K2}$	0	4	4	$0.34 \cdot su/[171 \cdot si]$
4	Hk_Defo	0.150	0.35	$K1 \cdot (S/160)^{K2}$	0	8	8	$0.22 \cdot su/[113 \cdot si]$

Kuva 5.15. RAKSU –rakenne (luokka 4, AB_D). Rakenne-, tila- ja deformaatiomallin tiedot.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Nimi	Kevät	Routa	Kesä_1	Helle	Syksy	MyöhSyksy	Talvi	Keskim
Pituus (d)	30	15	100	5	35	30	150	365.0
Pituus (%)	8.2	4.1	27.4	1.4	9.6	8.2	41.1	100.0
Lämpö (°C)	5	5	15	45	10	5	-5	4.7
Kosteusero (%)	1	3	0	0	1	2	0	0.5
Referenssi			X					
Eka_Periodi	X							

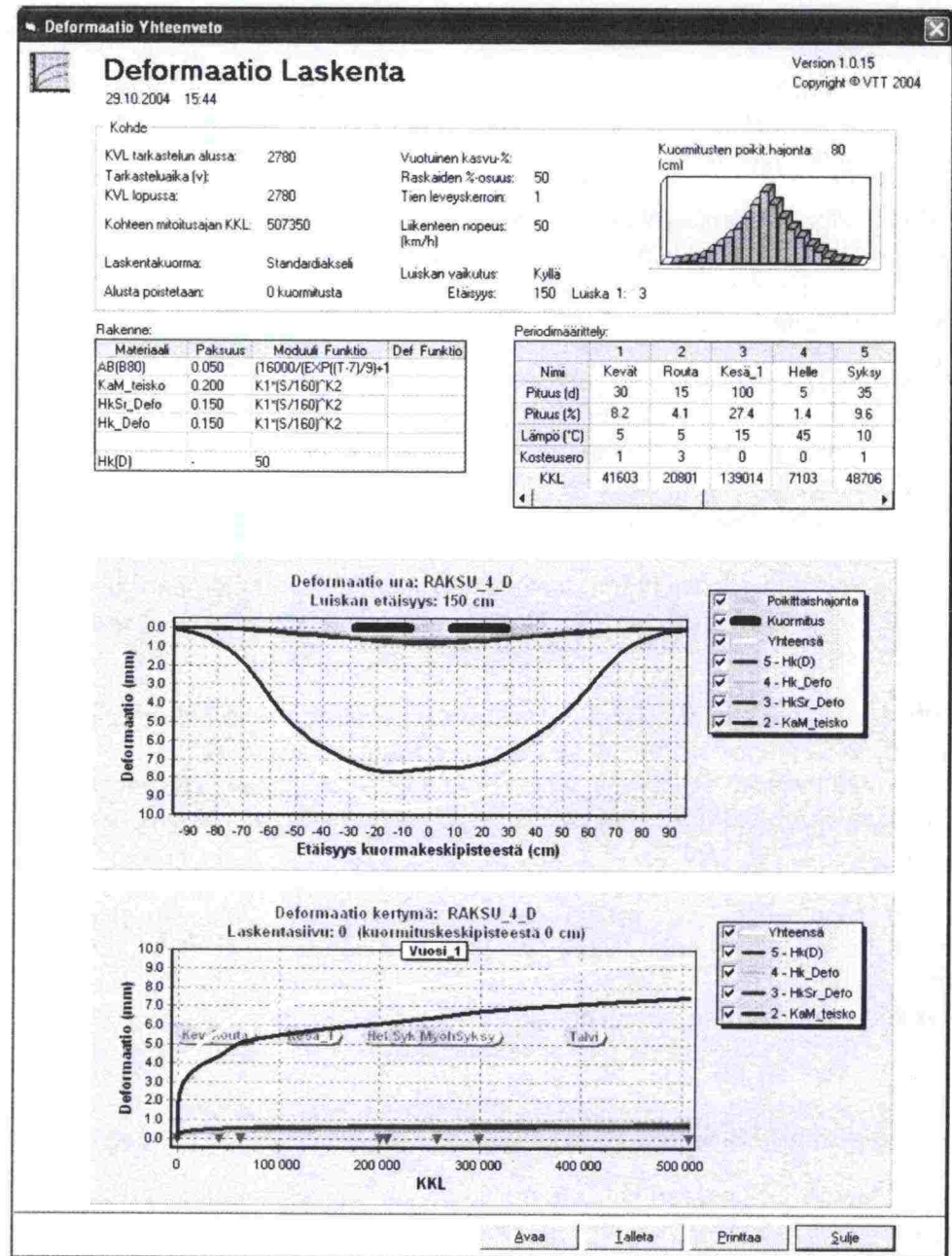
Moduulit periodittain (MPa)	Päivitys							
AB(B80)	8744	8744	4809	681	6688	8744	12263	8866
KaM teisko	E*0.9	E*0.7	262	286	261	256	E*8	0
HkSr Defo	E*0.9	E*0.7	120	124	118	E*0.8	E*10	0
Hk Defo	E*1.5	E*0.7	52	54	50	E*0.8	E*10	0
Hk(D)	E*2	E*0.7	50	50	E*0.9	E*0.8	E*10	50

Kuva 5.16. RAKSU –rakenne (luokka 4, AB_D). Periodi- ja materiaalitiedot.

Tässä esimerkissä on käytetty tarkempaa periodijakoa kun vakio-olosuhteissa tehdyssä edellisessä kokeessa. Erityisen merkittäviä jaksoja deformaation kannalta ovat kosteat periodit. Tässä laskennassa sellaisia ovat periodi 2 ("Routa") ja periodi 6 ("MyöhSyksy"). "Routa" -periodi kuvaa kevään routaantuneen/routineen rakenteen sulamista ja sen johdosta noususta kosteuspitoisuutta. "MyöhSyksy" -periodi kuvaa syksyn kosteampaa kautta. Näiden periodien merkitys näkyy kuvassa 5.17 kertymäkäyrän kulumamuutoksina.

On syytä tiedostaa, että erilaisten periodien laskentajärjestykselläkin on vaikutusta deformaation määrään – aivan kuten tilanne on todellisuudessaakin. Ensimmäisten periodien olosuhteet korostuvat, koska deformaation kasvu on nopeinta ensimmäisten kuormitus syklien aikana. Esimerkissä laskenta on aloitettu kevään olosuhteilla, mikä aiheuttaa hivenen suuremman lopullisen deformaation kuin jos laskenta olisi aloitettu esim. kesän olosuhteilla.

Kummassakin esimerkissä laskenta aloitettiin ensimmäisestä kuormituksesta. Laskennan aloitushetkeä voidaan tarvittaessa myöhentää. Tällä tavalla voidaan leikata pois nopein deformaatio ja kuvata myös vaihteittain rakentamista.



Kuva 5.17. RAKSU -rakenne (luokka 4, AB_D). Laskentatulokset, deformaation summa- ja nopeuskuvaajat. Tässä esimerkissä on käytetty useampia laskentaperiodeja.

5.10 Laskentatyökalun toiminnan varmentaminen

Laskentatyökalun toiminta on varmistettava ennen sen käyttöä hankintamenettelyn osana. Laskentatyökalua voi todentamattakin käyttää rakenteiden optimoinnissa.

Deformaation laskentatyökalun toiminnan verifioiminen (varmentaminen) deformaation määrän ennustustarkkuuden ja deformaationopeuden ennustustarkkuuden suhteen toteutetaan seuraamalla useita instrumentoituja tiekohteita useamman (3 – 5) vuoden ajan.

Todentamismittauksilla pyritään kussakin kohteessa määrittämään rakennekerroskohtaiset deformaatiot. Pinnan monitorointitulos on kaikkien mitattujen rakennekerrosmateriaalien deformaatio (ajan) kuormituskertojen funktiona kyseisessä kohteessa. Yhdestä todentamiskohteesta saadaan siis yksi - N todentamispistettä per mittauskerta laskentatyökalun ennusteen todentamiseen. Mitä enemmän kerroksia mitataan ja mitä useammin se tapahtuu, sitä parempi on todentamistarkkuus ja sitä enemmän laskentatyökalu kehittyy. Tarkemmin tämä todentamisen menettelytapa on kuvattu liitteessä 9.

Todentamisaineistoa voi löytyä myös muista pohjoismaisista selvityksistä. Wiman (2002) raportoi pinnalta kahdesti vuodessa mitatuista pinnan deformaatiomäärytyksistä Ruotsissa laajan rakennetyyppivertailun yhteydessä. Kyseessä oli moottoritiekohte, joten kokonaisdeformaatio jäi pieneksi, ollen 2 – 6 mm viidessä vuodessa.

Todentamisaineistoa voi syntyä myös pohjoismaisista HVS -kokeista. Ruotsissa on esimerkiksi tutkittu HVS -kokeissa kantavan kerroksen maksimiraekoon vaikutusta rakenteen vasteeseen. Tässä vaiheessa tuloksista ei kuitenkaan ole saatu mitään tietoja.

5.11 Laskentatyökalun kehitysmahdollisuudet

Laskentatyökalua voidaan kehittää monin tavoin. Tärkeimmiksi koetut kehitystarpeet ovat:

- Mallien kehitystä on jatkettava (selvitettävä elastisten monikerrosmallien ja / tai FEM -mallien sekä vetoa kestävä ja / tai vetoa kestävä materiaalmallien soveltuvuus deformaation määrittämiseen)
- Laboratoriokokeiden kehitystä tulee jatkaa (löydettävä ja määritettävä yksinkertaiset indeksikokeet suhteellisten erojen taloudelliseen määrittämiseen)
- Erilaisten tila- ja olosuhdemuuttujien vaikutus on määritettävä luokalleen (muuttujina tiiveys, kosteus, lämpötila, kuormitusnopeus)

- Uudet materiaalit ja niiden edellyttämät laskentamekanismit on kuvattava ja määrittävä (stabiloinnit, lujitteet)
- Sidotun päällysteen deformaation määrä ja -nopeus on tutkittava (AB, ABK, PAB, ...)
- Työkalu on viimeisteltävä prototyypistä suunnitteluohjelmaksi.

6 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa on kehitetty menettely, jolla urakoitsijat ja materiaali-toimittajat voivat hallita, mitoittaa ja mitata, deformaatiota osana toimivuus-vaatimus pohjaista hankintamenettelyä (kuvat 1.1 - 1.2). Menettelyllä voidaan jatkossa estimoida takuuajana tapahtuva deformaation määrä.

Tutkimushankkeen alkuperäisiin tavoitteisiin kuului myös kokeellinen vertaileva tutkimus kentällä. Koerakentamisen karsiuduttua projektista resurs-sisystä päätettiin kohdistaa voimavarat deformaation laskennalliseen arviointiin tarvittavan menettelytavan ja työkalun kehittämiseen.

Tutkimus käsittää kolme erillistutkimusta. Ensimmäinen tutkimus käsitteli deformaation mittaamenetelmiä, toinen määritti lämpötilan vaikutusta as-faltpäällysteisten teiden deformaatioon ja kolmas keskittyi luomaan yleisen laskentamenettelyn rakenteellisen deformaation ennustamiseksi rakenteen suunnitteluvaiheessa.

Mittausmenetelmätutkimuksessa kehitettiin, kokeiltiin ja kuvattiin tieraken-teen deformaation mittaamenetelmät. Hankkeen yhteydessä mitattiin yksi kohde Soinissa Länsi-Suomessa. Kehitetyt mittausmenetelmät soveltuvat uudisrakennuskohteisiin ja kohteisiin, jossa käytetään asemasekoitteisia massoja. Menetelmät eivät sellaisinaan sovi paikalla sekoitusjyrsittäviin ja stabiloitaviin kohteisiin.

Toisessa tutkimusosassa selvitettiin Kehä III:lla tehdyin mittauksin erilaisten päällyste – kantavakerros -rakenteiden deformatumista kesän 2002 helle-päivien johdosta. Mitatut deformaatiot asettuivat odotusten mukaiseen jär-jestykseen, vaikkakin jäykimmillä rakenteilla deformaatiota ei tapahtunut mitattavissa määrin. Pelkkä jäykkä kulutuskerros ei vähentänyt pinnan de-formaatiota läheskään siinä määrin kuin jäykän päällysteen ja jäykän kan-tavan kerroksen yhdistelmä.

Kolmannessa tutkimusosiossa kehitettiin yleinen kehys sekä prototyyppi-versio tierakenteen deformaation laskennalliseen arviointiin. Tutkimuksessa kuvattiin muuttujat, jotka vaikuttavat rakenteen deformatumiseen, tehtiin materiaalikokeita eri tyypillisillä rakennekerrosmateriaaleilla, luotiin materi-aaleille yksinkertaistetut deformaatiomallit ja deformaation laskentatyökalu. Deformaatioon vaikuttavista tekijöistä tehty kirjallisuusselvitys on liitetty ra-portin liitteeksi. Tutkimus kuvasi tierakenteen deformaation mekanismit ja siihen vaikuttavat tekijät. Hanke lisäsi tietoutta vaikuttavista tekijöistä ja si-ten edesauttaa deformaation vähentämistä.

Taskentatyökalun ensimmäinen versio on koekäyttövaiheessa (kuva 5.13). Koekäyttö tapahtuu VTT ekstranetin kautta. Kehitetty työkalu on rakenteel-taan avoin ja on myöhemmin laajennettavissa sekä ratkaisumenetelmiltään että materiaalivalikoimaltaan. Käyttäjät, mm. urakoitsijat ja konsultit, voivat tulevaisuudessa tuottaa itse omia materiaalimallejaan laskentamenettelyyn.

Laskentatyökalu soveltuu hyvin käytettäväksi Tiehallinnon kantavuusmitoitushjelman (APAS3) kanssa rakenteen mitoitus- ja optimointivaiheessa. Työkalut on tarkoitettu suunnittelijoiden työvälineiksi.

Tutkimuksen yhteydessä määritettiin kokeellisesti materiaalimallit vain neljälle sitomattomalle materiaalille (hiekkä, sora ja kaksi kalliomurskettä). Tutkimuksessa kuvattiin menettely, jolla uusia materiaaleja voidaan sisällyttää laskentatyökalun tietokantaan. Tiedot voidaan määrittää julkisiksi tai urakoitsijakohtaisiksi. Laskentatyökalun materiaalivalikoimaa on laajennettava erityisesti sidottujen materiaalien suuntaan, eli stabilointeihin ja päällystemassoihin. Samalla on täsmennettävä kosteuden ja alkutiiveyden vaikutus materiaalimalleihin. Verkkojen vaikutuksen huomioon ottaminen vaatii myös tarvittavien mitoitus teorioiden kehittämistä ja empiiristä aineistoa.

Tässä vaiheessa mallien materiaali parametrit on määritetty laboratoriossa ja mallien toimintaa on verrattu vain HVS -kokeiden tuloksiin. Jatkossa – riittävien materiaalitutkimusten, kenttä ja erityisesti todentamismittausten jälkeen – työkalua voidaan käyttää kantavuusmitoitusten ohessa rakenteiden mitoitus- ja optimointiprosessissa.

7 JATKOTUTKIMUSTARPEET

Tässä tutkimuksessa on määritetty kahden kalliomurskeen, yhden hiekkaisen soran ja hiekan deformaatiokäyttäytyminen vaatimusten mukaisessa tiiveydessä ja keskimääräisessä kosteustilassa. Tyypillisistä tierakennusmateriaaleista jäi puuttumaan soramurske ja moreenityyppiset materiaalit. Pehmeät pohjamaat – savi ja siltti jäivät kokonaan tutkimatta, joskin saven osalta löytyi joitakin norjalaisia tuloksia (Hovrli 1979). Myös siltistä löytyy syklisen kokeiden tuloksia (Odermatt 2000), mutta niitä ei voitu hyödyntää tässä tutkimuksessa.

Materiaaleista ainakin soramurske ja siltti tulisi tutkia siten, että niille saadaan deformaatiolaskennan vaatimat lähtötiedot.

Laboratoriotutkimuksiin käytettävissä olleiden resurssien rajallisuuden johdosta tutkimatta jäi kosteuspitoisuuden ja lähtötiiveyden vaikutus sitomattomien materiaalien deformaatio –ominaisuuksiin. Molemmat asiat vaativat lisätutkimuksia.

Kosteuden osalta riittäisi ilmeisesti määrän – lähes kyllästyneen – materiaalin tutkiminen. Vastaavasti tiiveyden osalta riittäisi määräysten mukaan alarajalle tiivistetyn materiaalin testaus, jotta selviää miten nopeasti huonosti tiivistetty materiaali tiivistyy ja vaikuttaako alhaisempi alkutiiveys vastaavalla määrällä lopulliseen deformaatioon.

Tutkittujen materiaalien staattiset lujuudet tulisi myös selvittää tarkemman mobilisointumistasen määrittämiseksi. Samalla varmistuisi johtuvatko tuloksista määritetyt korkeat lujuudet syklisen kuormituksen vaikutuksesta (tiivistyminen, rakeiden suuntautuminen, kuormituspulssin nopeus, hitausvoimat) vai ovatko ne materiaalityypeittäin edustavia.

Tutkimuksen aikana todettiin, että rakenteiden analysointiin soveltuvia elastisia monikerrosmalliin perustuvia ohjelmia ja elasto-plastisia elementtimenetelmä-ohjelmistoja on saatavilla. Kuitenkin vain yksi selvityksen piiriin kuuluneista FEM –ohjelmista pystyi sitomattomissa kerroksissa kehittyneiden vetojännitysten poistoon. Jatkossa mallinnuksen kehittäminen edellyttäneekin kuitenkin elementtimenetelmän käyttöönottoa, koska ratkaisun tulisi perustua elementtikohtaisen tilan ja siihen kohdistuvien ulkoisten kuormien perusteella tehtävään muodonmuutoksen määrittämiseen.

8 KIRJALLISUUS

Jauhiainen, P., Törnqvist, J. (2001). ICT –koe tien rakennekerrosateriaalien deformaatioherkkyyden määrittämisessä. Tiehallinnon selvityksiä 63/2001. Tiehallinto, Helsinki 2001.

Hovrli, I. (1979). Dynamisk pröving av leire for dimensjonering av veger. Dynamic testing of clay subgrades for pavement design. Universitet i Trondheim, Norges tekniske høgskole. Meddelelse nr. 20. ISBN 82-90345-00-3. 166 s. + liitteet.

Kivikoski H., Laaksonen R., Törnqvist J., 2003. Deformaation mittausmenetelmät. VTT RTE, sisäinen raportti RTE50-IR-13/2003. Espoo 2003.

Hoff, I. (1999). Material properties of unbound aggregates for pavement structures. Väitöskirja. NTNU Trondheim. 1999. ISBN 82-471-0421-0.

Ekblad, J. (2004). Influence of water on resilient properties of coarse granular materials. Lisensiaattityö. KTH, Tukholma 2004. TRITA-VT FR 03:03. ISSN 1650-867X.

Odermatt, N. (2000). Permanent deformation in fine-grained subgrade materials – Triaxial and accelerated pavement tests. Lisensiaattityö. KTH, Tukholma 2000. TRITA-IP FR 00-85. ISSN 1104-683X.

Kolisoja, P. (1997). Resilient deformation characteristics of granular materials. Väitöskirja. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Julkaisu 223.

Werkmeister, S. (2003). Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement construction. Väitöskirja. Technischen universität Dresden. Dresden 2003.

Korkiala-Tanttu, L., Laaksonen, R., Törnqvist, J. (2003). Kevään ja ylikuorman vaikutus ohutpäällysteisen tien vaurioitumiseen. Tiehallinnon selvityksiä 11/2003. Tiehallinto, Helsinki 2003.

Korkiala-Tanttu, L., Laaksonen, R., Törnqvist, J. (2003). Jyrkkäluiskaisen tien reunan vahvistaminen. Tiehallinnon selvityksiä 37/2003. Tiehallinto, Helsinki 2003.

Korkiala-Tanttu, L., Jauhiainen, P., Halonen, P., Laaksonen, R., Juvankoski, M., Kangas, H., Sikiö, J. (2002). Luiskatun tierakenteen urautuminen. Tiehallinnon selvityksiä. 33/2002. Tiehallinto, Helsinki 2002.

Kurki, T. (1998). Asfalttipäällysteiden urautumisen mallintaminen. ASTO-koeteiden tulosten 1990-1997 analysointi. Tielaitoksen selvityksiä 13/1998. Tiehallinto, Helsinki 1998.

Hyypä, I., Kelkka, M., Valtonen, J. (2003). Asfalttipäällysteiden deformaation, Kehä III:n mittaukset kesällä 2002. Teknillinen korkeakoulu, Tietekniikan laboratorio, Espoo 2003.

Gidel, G., Breyse, D., Hornych, P., Chauvin, J.-J., Denis, A. (2001). A new approach for investigating the permanent deformation behaviour of unbound granular material using the repeated load triaxial apparatus. Bulletin des laboratoires des Points et Chaussées, 233, Jyly-Augusta 2001. Ref. 4359. Pp 5-21.

Wiman, Leif G. (2002) (redaktör). Prov med olika överbyggnadstyper. VTI notat 52-2002. VTI Linköping 2002.

Tarefder, R.A., Zaman, M., Hobson, K. (2003). A laboratory and statistical evaluation on factors affecting rutting. The International Journal of Pavement Engineering. Vol. 4, Nr 1, March 2003, ss 59-69.

Lekarp, F., 1999. Resilient and permanent deformation behaviour of unbound aggregates under repeated loading. Väitöskirja. KTH, Stockholm 1999.

Järvinen, S., 2001. Vaurioitumismallit kuntorekisteriaineistossa rakenteen suunnittelujoita varten (1999-2001). Tiehallinnon selvityksiä 79/2001. Tiehallinto, Helsinki 2001.

Järvinen, S., 2003. Vähäliikenteisten teiden urautumisnopeus kuntorekisteriaineistossa (2002-2003). Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 14/2003. Tiehallinto, Helsinki 2003.

Ehrola, E., 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy, Helsinki 1996.

9 LIITTEET

1. Sitomattomien materiaalien pysyviin muodonmuutoksiin vaikuttavat tekijät, kirjallisuusseelvitys, 15 s.
2. Sykliset laboratoriokokeet. Materiaalit, jännityspolut ja syklimäärät, 1 s.
3. Syklisten kuormituskokeiden tulokset taulukoituna kokeittain (taulukko)
4. Proctor –kokeet (lomakkeet eri materiaaleille)
5. Rakeisuusmääritykset (lomakkeet)
6. Koetulokset kuvamuodossa (kaikki kokeet graafisesti esitettyinä)
7. Tierakenteen Deformaation Laskentatyökalu, Käyttöohje (erillisraportti)
8. Vastelaskennan erot APAS_3:n ja deformaatiotyökalun välillä
9. Laskentatyökalun todentaminen
10. Osa 1. Deformaation mittausmenetelmät (erillisraportti)
11. Osa 2. Asfalttipäällysteen deformatuminen (erillisraportti)

LIITE 1. SITOMATTOMIEN MATERIAALIEN PYSYVIIN MUODONMUUTOKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT, KIRJALLISUUSSELVITYS

1. Johdanto

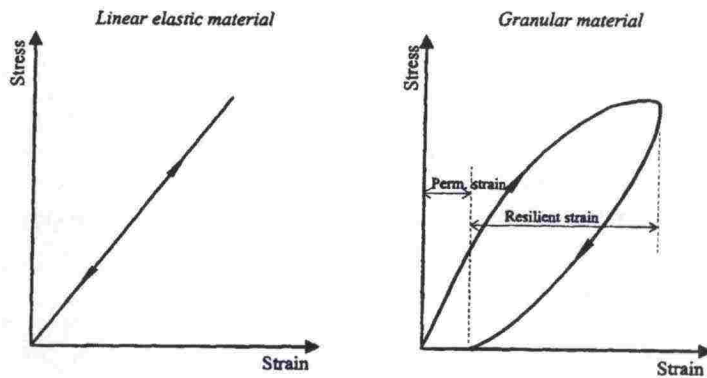
Kirjallisuusselvityksen tarkoituksena on luoda taustaa pysyvien muodonmuutosten materiaalimallin kehittelylle sekä osoittaa, miksi esitetyssä mallissa on päädytty korostamaan joitakin tekijöitä. Kirjallisuusselvitys tukeutuu osin raportissa "Tien rakennekerrosten materiaalit" (Tiehallinto 2001) esitettyihin tietoihin.

Sitomattomien tierakennekerrosten sekä pohjamaan pysyvien muodonmuutosten syntyminen on monimutkainen tapahtuma. Tähän tapahtumaan vaikuttavat materiaaliominaisuuksien lisäksi kohteen ympäristö, rakenteen geometria, ajan suhteen muuttuvat olosuhteet sekä kuormitus. Jotta laskentoja yleensä pystyttäisiin tekemään, on useita muodonmuutostapahtumaan vaikuttavia seikkoja yksinkertaistettava. Laskennoissa yleisesti käytetyt materiaalimallit ovat pääosin kehitetty jatkuville, lineaarisesti käyttäytyville materiaaleille. Sitomattomille rakeisille materiaaleille on tyypillistä että ne ovat alhaisillakin jännitystiloilla epälineaarisia ja vetoa kestävämpiä. Tämä tarkoittaa myös, että niiden ominaisuudet muuttuvat merkittävästi olosuhteiden mukana esimerkiksi lämpötilan tai vesipitoisuuden suhteen. Liikennekuormitukselle on luonteenomaista kuormien pulssimaisuus, ero kuormien suuruuksissa, sijainneissa, kuormitusaloissa sekä dynaamisissa sykäyksissä. Laskelmissa liikennekuormitus joudutaan yleensä oletamaan pysyväksi tai monotonisesti dynaamiseksi.

Muodonmuutosten suuruuteen vaikuttavien seikkojen monimutkaisuudesta johtuen laskennoissa käytetyt laskentatavat ovat olleet tähän asti osittain tai kokonaan kokemusperäisiä. Kokemusperäiset laskentatavat rajoittuvat vain niihin olosuhteisiin, joissa ne on kehitetty. Siksi niitä ei voida soveltaa olosuhteissa, joissa ympäristötekijät, kuormitus, materiaaliominaisuudet tai rakennustekniikka muuttuvat. Nämä rajoitukset ovat kasvattaneet tarvetta kehittää analyyttinen laskentamenetelmä kuvaamaan myös sitomattomien kerrosten pysyvää muodonmuutosta. Toisaalta rakennemateriaalien ominaisuuksien parempi tuntemus on luonut mahdollisuuksia tällaisen menetelmän luomiseen.

Rakeiset sitomattomat rakennekerrokset sekä pohjamaa käyttäytyvät pienilläkin kuormituksilla epälineaarisesti (kuva 1, oikea puoli) eli lineaariseen otaksumaan (kuva 1, vasen puoli) perustuvat muodonmuutoslaskelmat yleensä ottaen aliarvioivat tapahtuvia muodonmuutoksia. Erityisen suuria pysyviä muodonmuutoksia syntyy keväällä. Roudan sulaminen ja rakenteessa oleva vesi aiheuttavat rakennekerrosten löyhtymistä, jota lisää pysyviä muodonmuutoksia. Pysyviä muodonmuutoksia tapahtuu myös alueilla, joissa pohjamaa on heikosti kantavaa tai rakennekerrosmateriaalit ovat huo-

nolaatuisia. Myös rakenteiden kosteus eli kuivatusjärjestelyjen puutteet heikentävät tierakenteen kantavuutta lisäten näin muodonmuutoksia.



Kuva 1. Lineaarisesti elastisen ja rakeisen materiaalin periaatteelliset jännitys-muodonmuutoskuvaajat. /Lekarp 1997/.

Merkittävimmät pysyvät muodonmuutokset, kun nastarengaskulumista ei oteta huomioon, tapahtuvat kevytpäällysteisillä teillä. Kevytpäällysteisillä teillä tarkoitetaan alempiluokkaisia teitä, joiden päällyste on ohut ($AB, PAB \leq 80$ mm) ja/tai pehmeä. Muita tyypillisiä piirteitä muodonmuutosherkille tierakenteille ovat:

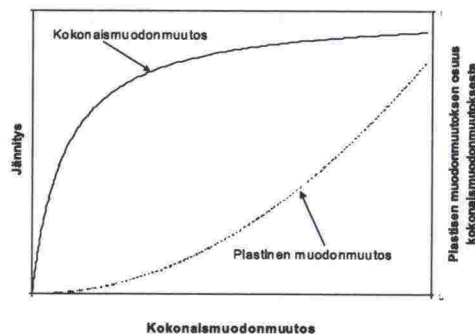
- ohut tai puuttuva jakava kerros
- käytetyt rakennusmateriaalit ovat huonompilaatuisia tai ne ovat löyhässä tilassa
- kapea tiepoikkileikkaus
- tien pientareet ovat kapeat ja luiskat ovat jyrkät
- kokonaiskerrospaksuus on pieni, rakenne ohut
- tierakenteen kuivatus ei toimi
- pohjamaan ja/tai rakennekerrosten vuotuinen routiminen

Muodonmuutokset jaetaan yleensä sekä pysyviin että palautuviin muodonmuutoksiin. Pienillä jännityksillä ja alhaisilla muodonmuutostasoilla muodonmuutokset ovat pääosin palautuvia, kimmoisia. Plastisen muodonmuutoksen osuus kasvaa jännitysten ja muodonmuutostason kasvaessa (kuva 2a).

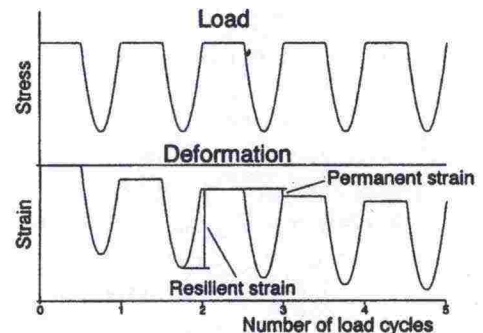
Rakeisella materiaalilla tapahtuu kuormituksesta johtuvaa tilavuudenmuodonmuutosta ja leikkausmuodonmuutosta. Tilavuudenmuodonmuutos on kesimääraisten jännitysten aiheuttamaa rakenteen tiivistymistä tai löyhelymistä, joka tapahtuu pääasiassa pystysuuntaan. Tilavuudenmuutosta tapahtuu ajourien kohdalla ja niiden lähiympäristössä. Myös pohjamaan painuminen on luonteeltaan tilavuudenmuodonmuutosta, tiivistymistä. Leikkausmuodonmuutoksella tarkoitetaan leikkausjännitysten aiheuttamaa muo-

donmuutosta, jota kutsutaan yleensä liukumaksi. Liukumaa tapahtuu pääosin vaakasuuntaan ja se kasvattaa ajourien kohdalle syntyvää urautumista. Leikkausmuodonmuutoksen yhteydessä materiaali voi tiivistyä, löyhtyä tai olla muuttamatta tilavuuttaan. Kevytpäällysteisillä teillä liukumien arvioidaan muodostavan merkittävän osan muodonmuutoksista.

Sykliisessä kuormituksessa syntyy sekä pysyvää (permanent strain) että palautuvaa muodonmuutosta (resilient strain = palautuva muodonmuutos)(kuva 2b). Koko muodonmuutos - kuormitustapahtuma on yksi prosessi, jossa muodonmuutokset ovat vahvasti sidoksissa toisiinsa. Itse asiassa muodonmuutosprosessin jako kahteen eri prosessiin (pysyvä / palautuva) ei kuvaa tapahtumaa oikein. Tämä jako voidaan tehdä luotettavasti vain jos pysyvien muodonmuutosten osuus yhden kuormitus syklin aikana on murto-osa palautuvasta muodonmuutoksesta /Huurman 1997/.



Kuva 2a. Yleistetty maapohjan plastisointimiskuvaaja.



Kuva 2b. Rakeisen materiaalin muodonmuutokset syklisessä kuormituksessa /Huurman 1997/.

Eri tekijöiden vaikutusta syntyviin muodonmuutoksiin on tutkittu pääasiassa palautuvien muodonmuutosten osalta. Kuitenkin voidaan olettaa, että useimmissa tapauksissa näiden tekijöiden vaikutus on samansuuntainen myös pysyvien muodonmuutosten osalta.

2. Kuormituksen aiheuttamat tekijät

2.1 Jännitystilän vaikutus

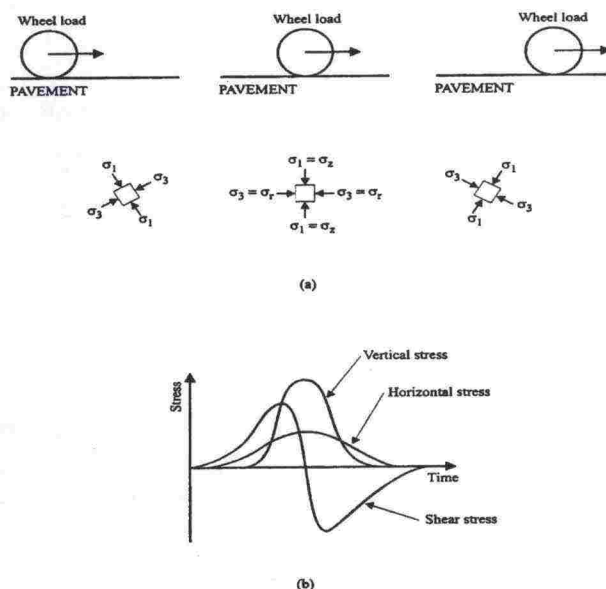
Tutkimukset ovat osittaneet, että merkittävin pysyvien muodonmuutosten suuruuteen vaikuttava tekijä on jännitystila /COST 337 1998/. Jo ensimmäiset kolmiakselikoetulokset osoittivat, että pysyvän muodonmuutoksen suuruus on suoraan verrannollinen leikkausjännitykseen ja kääntäen verrannollinen sellipaineeseen /Morgan 1966/. Tämän jälkeen tutkijat ovat todeneet kokonaisjännitystilän ohjaavan muodonmuutoksia. Jännitystilaa verrataan usein staattisen leikkauslujuuteen, jonka on katsottu olevan suurimman mahdollisen leikkausjännitystilän. Yleensä näiden vertailujen tavoitteena on

arvioida materiaalin muodonmuutosherkkyyttä. Eräät tutkijat, kuten Lekarp /1999/ ovat kyseenalaistaneet staattisen leikkauslujuuden soveltamisen. Heidän mielestään liikennekuormitetun materiaalin murtuminen on portaattain etenevä tapahtuma eikä hetkellinen sortuma. Siksi heidän mielestään pelkästään staattista murtotilaa ei voida käyttää hyväksi arvioitaessa syklistä lisääntyviä pysyviä muodonmuutoksia.

2.2 Pääjännitysten kiertyminen ja liikennekuormituksen luonne

Liikkuvan pyöräkuorman aikaansaama rasitus muuttaa pääjännitysten suuntakulmaa kuormituksen kestoajana (kuva 3). Useassa artikkelissa on todettu, että tällä ilmiöllä on selvä vaikutus muodonmuutoksiin /Brown 1996/. Laboratoriossa tehtävillä kolmiakselikokeilla ei kuitenkaan voida mallintaa pääjännitysten kiertymistä. Sama ilmiö voidaan havaita laboratoriossa esimerkiksi suorassa leikkauskokeessa ja hollow cylinder testeillä tai koetiekone -kokeissa. Pääjännitysten kiertyminen lisää muodonmuutoksia, mutta liikeyksen suuruutta ei nykyisellä tietämyksen tasolla tunneta.

Täysimittakaavaisilla koetiekonekokeilla on havaittu, että rakenteiden kuormitussuunta vaikuttaa hieman tuloksiin. Yhdessä koesarjassa testipyörää ajettiin edes - takaisin ja toisessa vain yhteen suuntaan. Urautuminen on aavistuksen pienempää yksisuuntaisesti ajatussa kokeessa, mutta ero ei ollut merkittävä (alle 5 %) /Huhtala & Pihlajamäki 2000/. Vastaavaan tulokseen päätyi Chan /Chan 1990/. Hänen hollow cylinder -kokeensa osoittivat, että kaksisuuntaisesti kuormitetuissa kokeissa pysyvät muodonmuutokset olivat yksisuuntaisesti kuormitettujen kokeita suurempia. Hänen mukaansa tämä ero oli sitä suurempi, mitä suurempi leikkausjännitys oli suhteessa normaali jännitykseen.



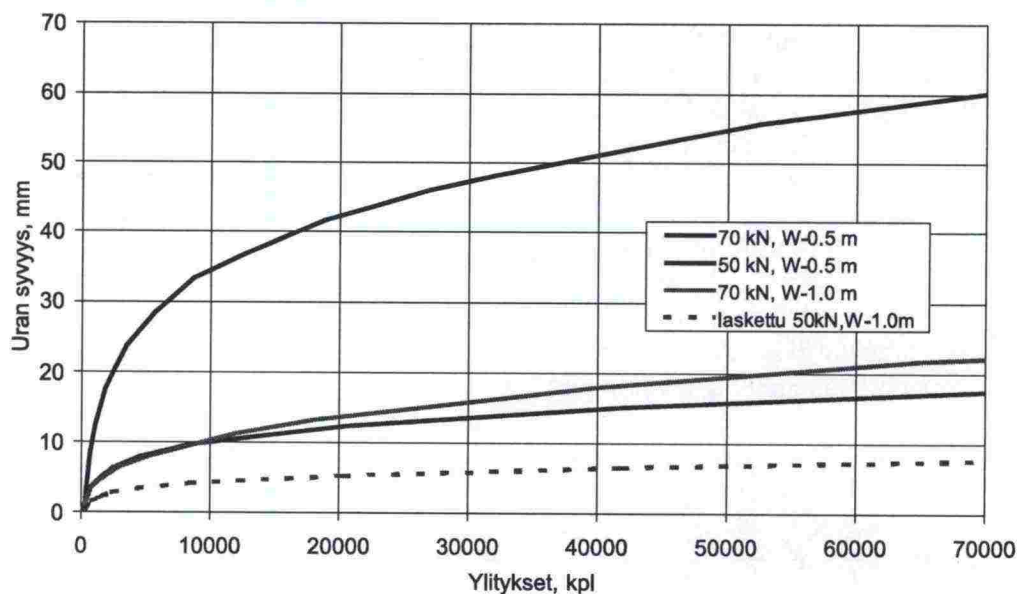
Kuva 3. Jännitysten kiertyminen liikennekuorman alla. /Lekarp 1997/

2.3 Kuormituskertojen lukumäärä

Pysyvien muodonmuutosten syntyminen on portaattainen prosessi, jossa jokaisen kuormitusyksiön synnyttää lisää pysyvää muodonmuutosta. Kuormituskertojen lukumäärällä on siis suora vaikutus muodonmuutosten suuruuteen (kuvat 4 ja 5).

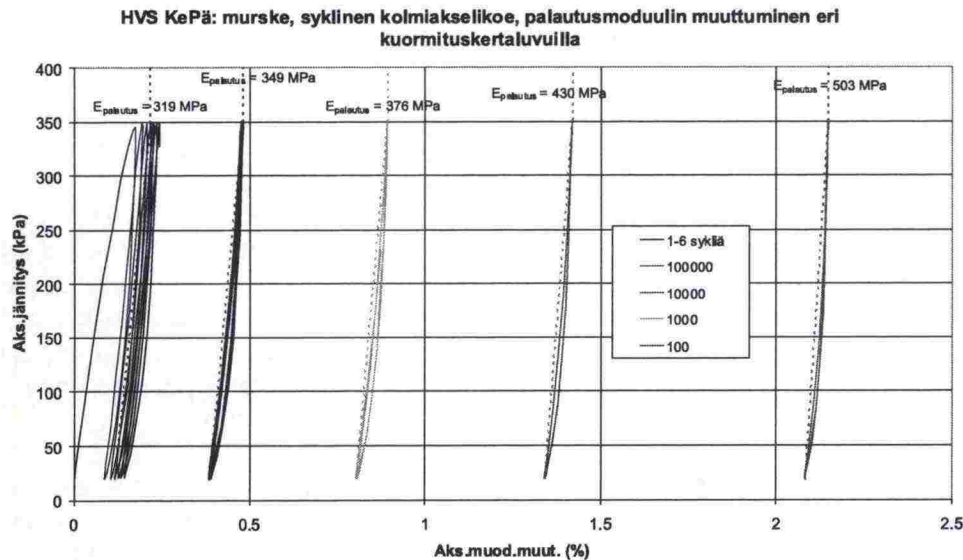
Kuvassa 4 on esitetty HVS "Kevät-ylikuorma" kokeen asfaltin pinnan urautumiskehitys. Kaikilla vedenpinnan ja kuormituksen tasoilla urautumiskehitys on ollut vaimenevaa ja luonteeltaan pääosin tiivistymistä. Tämä näkyy parhaiten siinä, että syntynyt ura on ollut suppilon muotoinen sekä asfaltin päällä että syvemmällä eri rakennekerrosten yläpinnoilla. /Korkiala-Tanttu et al. 2003/.

Kuvan 5 kalliomurske tiivistyi koko syklisen kolmiakselikokeen ajan, joka näkyy kuvan palautusvaiheen moduulin jatkuvana kasvuna sekä muodonmuutossilmukan koon pienentymisenä. Myös useassa HVS-kokeissa on havaittu, että muodonmuutokset ovat luonteeltaan pääosin tiivistymistä.



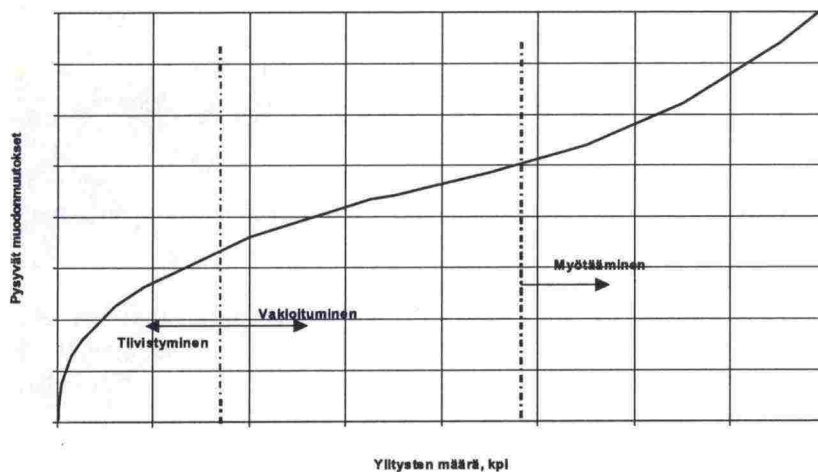
Kuva 4. HVS koe "Kevät-ylikuorma". Asfaltin pinnan urautuminen eri kokeissa /Korkiala-Tanttu et al. 2003/.

Maamateriaalien muodonmuutuskäyttäytymisessä syklisen kuorman alaisuudessa voidaan havaita kolme eri vaihetta: tiivistyminen, vakioituminen ja 'myötääminen' (kuva 6). Tiivistymistä tapahtuu heti kuormituksen lisäämisen jälkeen.



Kuva 5. Kalliomurskeen muodonmuutoskäyttäytyminen eri kuormituskertamäärillä kolmiakselikokeessa.

Mikäli rakenteen jännitystila on riittävän kaukana sen maksimilujuudesta, tiivistyminen vaimenee kuormituskertojen lisääntyessä. Muodonmuutokset taasaantuvat tällöin kohti tiettyä vakioarvoa. Jos rakennekerroksen jännitystila ylittää materiaalille ominaisen 'shake down' -arvon, materiaali alkaa myötäämään ja pysyvät muodonmuutokset alkavat kasvaa. Tämä 'shakedown' arvo on luonteeltaan saman tyyppinen kuin muualta maamekaniista tuttu myötöraja. Eräissä hyvin pitkälle viedyissä kolmiakselikokeissa on havaittu, että kokeet, jotka näyttäisivät vakioituneen pysyvästi, tapahtuu erittäin suurilla ylitysten määrillä kuitenkin myötääminen /Kolisjoja 1997/. Tämän voidaan olettaa johtuvan siitä, että materiaali ylittää staattisen kapasiteettinsa mukaisen muodonmuutosrajan (myötörajan).



Kuva 6. Rakeisen maamateriaalin muodonmuutoskäyttäytymisen eri vaiheet.

Tierakennusmateriaalien pysyviä muodonmuutoksia eri vaiheissa on tutkittu laajasti Dresdenin yliopistossa. Werkmeister /2002/ on kehittänyt 'shakedown'-konseptiin perustuvaa materiaalimallia. Eri vaiheiden pituudet ja suuruudet riippuvat monesta tekijästä: tiiviys- ja jännitystilasta, kuormituksesta, vesipitoisuudesta jne. Kaikkia kolmea vaihetta ei välttämättä joka kokeessa / materiaalissa havaita. Mitoituksessa pyritään siihen, että myötäämisvaihe jää kokonaan pois. Eli tällöin materiaalin jännitystila pyritään pitämään koko käyttöajan 'shakedown' rajan alapuolella, jolloin myös pysyvät muodonmuutokset pysyvät kohtuullisina. Yksittäisissä, korkeilla jännitystasoilla tehdyissä, kokeissa on havaittu, että rakenne myötää heti eikä tiivistymis- ja vakioitumisvaiheita havaita lainkaan.

2.4 Kuormitushistoria

Kuormitushistorialla tarkoitetaan erisuuruisten kuormien vaikutusjärjestystä. Kuormien järjestyksellä on selvä vaikutus pysyvien muodonmuutosten suuruuteen. Tämä johtuu siitä, että merkittävä osa pysyvistä muodonmuutoksista on luonteeltaan tiivistymistä. Jos rakennetta kuormitetaan heti aluksi suurella kuormalla, aiheutuu siitä selvästi suurempi muodonmuutos kuin olisi aiheutunut, mikäli rakennetta olisi ensi kuormitettu usealla pienemmällä kuormalla, jotka olisivat jo osaltaan tiivistäneet rakennetta. Vaikka ilmiö on tunnistettu, sitä ei ole juurikaan tutkittu. Koeolosuhteissa tämä ongelma ratkaistaan yleensä käyttämällä uusia näytteitä tai kuormittamalla rakennetta vähitellen. Gidel & al. (2000) on toisaalta sitä mieltä, että likimain samaan muodonmuutostasoon päästään vaikka kuormitustasoa nostettaisiin portaittain.

Tien rakennusaikana rakennekerrokset tiivistetään vähintään 95-97 % Proctor-tiiveyteen. Kun tiellä aloitetaan liikennöinti, rakennekerrosten tiivistyminen jatkuu. Oulun Yliopiston tekemien havaintojen perusteella 1 - 2 vuotta liikenteellä olleilla tiellä on tiiveyksien ajouran kohdalla todettu nousseen yli 100 prosenttiin suhteessa Parannetulla Proctor-kokeilla määritettyyn maksimitiiveyteen. Tiivistymisen syvyysvaikutus ei ole tiedossa. Jos vaikutus ulottuu syvälle, niin jälkitiivistyminen muodostuu suureksi.

3. Rakeisuusmuuttujat

3.1 Yleistä

Rakeisuusmuuttujien, kuten raekokajakautuman huomattavat vaikutukset materiaalin moduuliin, käyvät ilmi jo erilaisissa rakeisuuskäyriin pohjautuvissa moduulien arviointimenettelyissä. Eri tekijöiden vaikutukset materiaalin jäykkyyteen eivät kuitenkaan välttämättä kaikki ole aivan niin yksiselitteisiä kuin arviointimenettelyjen perusteella voisi olettaa. Eri tekijöiden vaikutukset ovat moninaisessa keskinäisessä riippuvuussuhteessa toistensa kanssa. Eri tekijöiden vaikutusten "suuret linjat" ovat usein saman tyyppisiä erilaisilla materiaaleilla, esimerkiksi kyllästyneessä tilassa moduuli on yleensä pie-

nempi kuin kuivassa tilassa. Erot ja vaikutukset rakeisuusmuuttujiltaan erilaisten materiaalityyppien käyttäytymisessä näiden ääriarvojen väliin jäävässä, käytännön rakenteissa vaikuttavissa vesipitoisuuksissa, voivat kuitenkin olla hyvinkin suuria. Erot eivät välttämättä aina kaikilta osiltaan ole edes saman suuntaisia, muidenkin tekijöiden (rakeiden ominaisuudet, tiiviystila, jne.) vielä vaikuttaessa materiaalin käyttäytymiseen. Tämä johdosta jonkin tietyn tekijän vaikutuksia on yleensä tarkasteltava materiaaliakohtaisesti muita tekijöitä tarvittaessa varioiden.

3.2 Raekokojakautuma

Rakeisuuskäyrän muoto määrää pitkälti sen, minkä kokoisten rakeiden muodostaman raerungon kautta kuormitus maamateriaalissa välittyy. Rakeisuuskäyrältään optimaalisesti ns. Fullerin käyrän mukaan kulkevissa materiaaleissa kaikki raekoot osallistuvat parhaiten kuormituksen jakamiseen. Mikäli materiaalissa on enemmän karkeitä rakeita eli rakeisuuskäyrä on roikkuva, karkeampi kiviaines toimii kantavana rakenteena, mutta hienoinen saattaa olla hyvin löyhänä karkeampien rakeiden välissä. Tästä syystä myös materiaalin tiiviys jää yleensä alhaisemmaksi kuin mihin rakeisuusjakautumaltaan suhteistuneempi materiaali pystytään samalla työmäärällä tiivistämään. Näin se saavuttaa olettavasti myös suuremman jäykkyyden. Tähän suuntaan olevia havaintoja on tehty myös kalliomurskeiden koekuormituksissa /Kolisoja 1996/.

Myös muut tekijät kuten vesipitoisuus ja kivilaji vaikuttavat yhdessä raekokojakautuman muodon kanssa. Kirjallisuustutkimuksessa /Kolisoja 1993/ referoiduissa tutkimuksissa kuivalla dolomiittikalkkikivellä saavutettiin paras kyky vastustaa palautuvia muodonmuutoksia lajittuneimman rakeisuuden omaavilla näytteillä. Samalla tiivistystyöllä saavutetusta suuremmasta tiheydestä huolimatta hienomman aineksen lisääminen karkearakeisen kiviaineksen huokostilan täytteeksi ei yllättäen parantanut palautuvan muodonmuutoksen moduulia, vaan alensi sitä. Saman suuntaiseen tulokseen päädyttiin myös esiselvitysvaiheen /Kolisoja 1993/ kuivan murskatun kiviaineksen kuormituskokeissa. Osittain veden kyllästämillä materiaaleilla tilanne on kuitenkin toinen mm. näennäisestä koheesiosta riippuen.

Mikäli rakeisuuskäyrän muoto rakeisuuspohjalla suorenee pakkautumisen kannalta optimaaliseen muotoon, keskikarkeiden lajitteiden ollessa ylliedustettuina (ns. hiekkapatti), moduuli alenee, koska tasarakeinen materiaali ei suuremmissa huokosissa tiivisty yhtä hyvin kuin kauttaaltaan suhteistunut materiaali. Äärimmillään karkeimmat rakeet saattavat irrota toisistaan kokonaan /Kolisoja 1996/.

Ekblad (2004) tutki raekokojakautuman ja hienoainesmäärän vaikutusta materiaalin jäykkyyteen. Tulokset osoittavat jäykkyyden riippuvan kääntäen materiaalin hienoainespitoisuudesta. Yhtä yksikäsitteistä yhteyttä hienoainespitoisuuden ja pysyvien muodonmuutosten välille ei löytynyt. Vastaavasti vesipitoisuuden nousu alentaa eniten hienoainespitoisten massojen jäykkyyttä.

3.3 Maksimiraekoko

Materiaalin maksimiraekoko vaikuttaa erittäin merkittävästi sen jäykkyysmoduulin eli myös palautuviin muodonmuutoksiin. Maksimiraekoon pientyminen alentaa jäykkyysmoduulin arvoa. Esim. dolomiittikalkilla palautuva leikkausmuodonmuutos 50 kPa:n sellipaineella on kasvanut suhteellisen maksimiraekoon puolittuessa arvosta ~0,3 % arvoon ~0,5 % ja maksimiraekoon edelleen puoliintuessa arvoon ~0,7 % kun deviatorinen jännitys on ollut 0...100 kPa. Suuremmalla deviatorisella jännitysvälillä (0...200 kPa) palautuva leikkausmuodonmuutos on vastaavasti kasvanut arvosta ~0,6 % arvoihin ~1,6 % ja ~2,5 % /Kolisoja 1993/.

Hoff (1999) totesi tutkimuksessaan maksimiraekoon vaikuttavan merkittävästi jäykkyyteen. Tutkimuksessa käytetty maksimiraekoko oli 120 mm.

Maksimiraekoon vaikutus moduuliin tulee huomioida erityisesti laboratoriossa suoritettavissa moduulimäärytyksissä. Materiaalin rakeisuutta skaalaamalla (muuttamalla maksimiraekokoa, mutta pitämällä raekäyrän muoto entisellään) ei hyvin karkearakeisen materiaalin moduulia siten voida tarkasti määrittää. Testaus tulisi tehdä aina rakeisuudeltaan mahdollisimman lähellä todellista materiaalia olevilla näytteillä /Kolisoja 1993/.

Suomessa maksimiraekoon vaikutusta on selvitetty dynaamisella kolmiakselikokeella ja syklisellä levykuormituskokeella. Kolmiakselikokeissa näytteiden rakeisuuksien erot olivat niin vähäisiä, ettei selkeitä riippuvuuksia saatu esille. Sen sijaan syklisissä levykuormituskokeissa raekoon kasvaminen 20 mm:stä 55 mm:iin on suurentanut levykuormituskokeen moduulin jopa nelinkertaiseksi /Kolisoja 1993/. Karkearakeisemman materiaalin paremmat muodonmuutosominaisuudet johtuvat ilmeisimmin muodonmuutosten keskittymisestä harvalukuisempiin raekontakteihin ja niiden läheisyyteen toisin kuin hienorakeisemmassa materiaalissa /Kolisoja 1996/.

3.4 Hienoainespitoisuus

Hienoainespitoisuuden (lajite < # 0,074 mm) vaikutus kiviaineksen moduuliin ei ole yksikäsitteinen /Kolisoja 1993/. Mikäli materiaalissa on hienoainesta kohtuullisen vähän, pääsevät materiaalin karkeammat rakeet toistensa kanssa suoraan kosketukseen, ja kuorma välittyy edelleen niiden muodostaman raerungon kautta. Hienoainesmäärän kasvaessa kaikki hienorakeisempi materiaali ei enää välttämättä mahdu karkeampien rakeiden väliin tyhjätiloihin, minkä seurauksena karkeammat rakeet saattavat menettää suoran kosketuksen toisiinsa /Kolisoja 1996/.

Murskatuilla kiviaineksilla hienoainesmäärän vaikutus palautuvaan muodonmuutokseen on vaihteleva ja vähäinen. Sen sijaan kirjallisuustutkimuksessa havaittiin, että hiekat ja soramateriaalit ovat herkempiä hienoainespitoisuuden vaihteluille kuin vastaavan raekoostumuksen omaavat murskatut, kulkimikassärmäiset materiaalit. Yleisesti ottaen hienoainesmäärän kasvun otaksutaan alentavan jäykkyysmoduulia. Materiaalitutkimusten koekuormituksis-

sa lajittuneella Sievin kalliomurskeella noin 10 % hienoainemäärä aiheutti noin 15 % alentumisen jäykkyysmoduuliin /Kolisoja 1996/.

Hienoaineksen määrän ohella myös hienoaineksen laatu vaikuttaa materiaalin muodonmuutuskäyttäytymiseen. Mitä aktiivisemmin ja runsaammin hienoaines sitoo vettä itseensä, sitä suuremmaksi kasvaa riski jäykkyysmoduulin alentumiseen sekä veden toimiessa suoranaisesti liukastusaineena rakeiden pinnalla että huokosveden ylipaineen kehittymismahdollisuuden myötä /Kolisoja 1996/. Hienoaineksen savipitoisuuden (lajite < # 0,002 mm) kasvulla näyttäisi olevan jäykkyysmoduulia alentava vaikutus, joskin sen merkitys näyttäisi olevan sidoksissa myös materiaalin vesipitoisuuteen. Esimerkiksi savipitoisuuden kasvu 0,4 %:sta hieman yli 2 %:iin näyttäisi alentavan moduulin suuruutta 15...20 % (kyllästynyt / w=4,5 %). Pienillä vesipitoisuuksilla (w=2,0 %) ja savipitoisuuksilla (0,4...1,0 %) moduulin arvo saattaa tosin hieman kasvaakin. Vaikutuksen on arveltu olevan riippuvainen myös savilajitteen mineralogisesta koostumuksesta /Kolisoja 1993/.

4. Olosuhdemuuttajat

4.1 Kosteustila

Kosteustilan vaikutus karkearakeisten materiaalien muodonmuutosominaisuuksiin on selvä. Vaikutuksen suuruus ja suunta riippuvat kuitenkin sekä materiaalityypistä että kosteuden määrästä. Osittain kyllästyneillä suhteistuneilla materiaaleilla kosteus kasvattaa jäykkyysmoduulia. Tämä aiheutuu osittain veden kyllästämissä huokosissa vaikuttavasta pintajännityksestä (näennäisestä koheesiosta), joka vetää maarakeita toisiaan vasten. Tämän vaikutuksen suuruus riippuu maamateriaalin keskimääräisestä rae/huokoskoosta ja veden määrästä sekä kiviaineksen pintaominaisuuksien ja veden välisestä vuorovaikutuksesta. Runsaasti hienoainesta sisältävillä ja tiiviisti pakkautuvilla materiaaleilla vaikutus on suurempi. Näennäisestä koheesiosta aiheutuvaksi on tulkittu myös alhaisilla vesipitoisuuksilla karkearakeisella kalliomurskeella (0...40 mm) havaitut melko suuret moduulien erot; vesipitoisuuden kasvu eräällä kalliomurskeella 0,7 %:sta 1,8 %:iin aiheutti moduulin alentumisen noin puoleen jakavassa ja kantavassa kerroksessa tyypillisesti esiintyvällä pääjännitysten summan alueella /Kolisoja 1993/. Ekblad (2004) on käsitellyt kattavasti veden ja huokostilan imupaineen (matrix suction) vaikutusta rakeisen materiaalin jäykkyyteen.

Vesipitoisuuden vaikutus materiaalin palautuvaan jäykkyysmoduuliin on edullinen vain suhteellisen alhaisilla vesipitoisuuden / kyllästysasteen arvoilla. Kyllästysasteen kasvaessa yhä suurempi osa huokosista täyttyy vedellä. Näennäisen koheesion vaikutus lakkaa kokonaan, kun materiaali on veden kyllästävä. Useiden rakeisten materiaalien jäykkyysmoduulien on havaittu alenevan suuremmilla vesipitoisuuksilla (kyllästysaste 20...100 %) (Kolisoja 1993, Ekblad 2004). Materiaalin ollessa lopulta kokonaan kyllästynyttä heikenee sen kyky vastustaa sekä palautuvia että pysyviä muodonmuutoksia oleellisesti. Pysyvien muodonmuutosten osalta kriittisenä kyllästysasteen

rajana pidetään sorilla ja murskeilla 80...85 % rajaa, jonka jälkeen riski pysyville muodonmuutoksille kasvaa voimakkaasti. Materiaalin kosteuspitoisuuden vaihtelun vaikutuksen on todettu olevan suurin pyöristyneillä murskaantumattomilla rakeilla, mutta vähäisempi murskatulla kiviaineksella /Kolisoja 1993/. Käytetyllä tiivistystyöllä tai materiaalin raekokojakautumalla ei sen sijaan todettu olevan selvää vaikutusta muodonmuutosominaisuuksien kosteusherkkyyteen.

Havaintojen perusteella vesipitoisuuden vaihtelu ääriarvojensa välillä (kuiva, kyllästynyt) saattaa vaikuttaa materiaalin moduuliin jopa lähes puolella /Kolisoja 1993/. Vaikutuksen suuruus ja suuntakin vaihtelevat kuitenkin materiaalista ja rakeisuusjakautumasta riippuen. Pienimmillään vesipitoisuuden vaihtelut näyttäisivät olevan suhteistuneella soramurskeella. Lajittuneella soramurskeella vaihtelut olivat puolestaan suuria. Vesipitoisuuden kasvattaminen alensi moduulin tasoa n. 40 %. Lajittuneella kalliomurskeella vesipitoisuuden kasvu kuivasta kosteaan ja kyllästyneeseen tilaan alensi moduulia noin neljänneksen ja suhteistuneella kalliomurskeella vesipitoisuuden nousu puolestaan nosti moduulin arvoa noin kolmanneksen ($w \sim 2\%$ tai kyllästynyt).

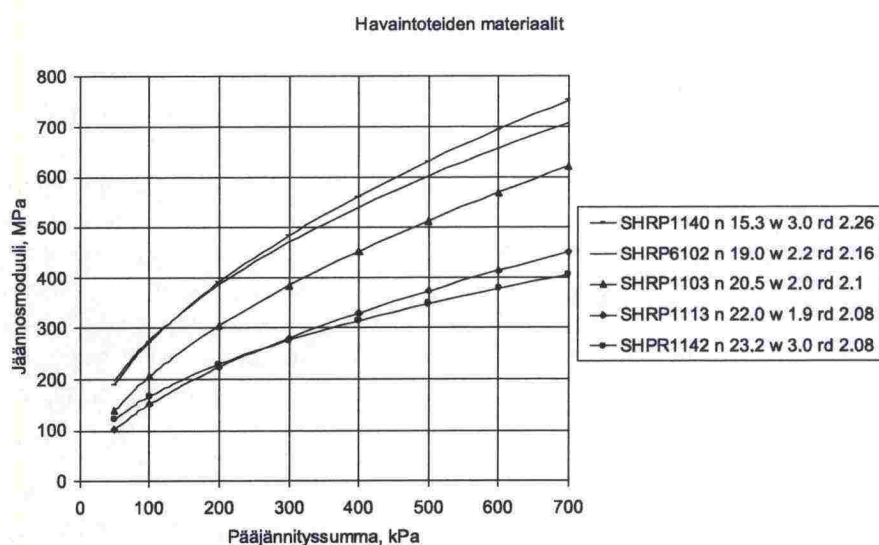
Rakeisuusjakautuman vaikutukset jäykkyysmoduuliin näyttäisivät kuitenkin pienentyvän merkittävästi, kun vesipitoisuus lähenee käytännön rakenteissa vaikuttavia vesipitoisuuksia. Täysin kuivien materiaalien ja toisaalta täysin kyllästyneiden materiaalien esiintyminen tierakenteissa on harvinaista. Tiilannetta, jossa ylemmät rakennekerrokset ovat kyllästyneet, ei saisi päästä syntymään lainkaan.

4.2 Tiiviystila

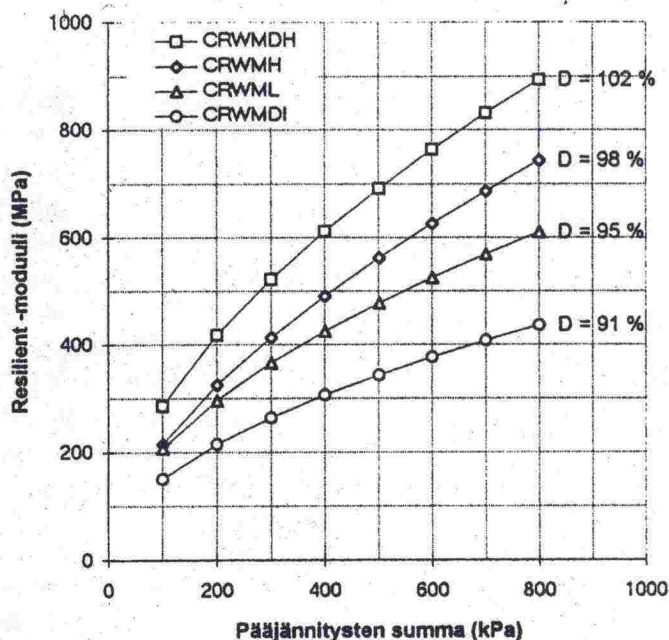
Materiaalin tiiviystila on yksi tärkeimpiä karkearakeisen materiaalin moduuliin vaikuttavista tekijöistä. TPPT-tutkimuksen havaintoteiden kantavan kerroksen näytemateriaalien jäykkyysmoduulit olivat suurimmilla tilavuuspainoilla lähes kaksinkertaisia löyhempien näytteiden jäykkyysmoduulien nähden. SHRP-tutkimuksen havaintoteiden materiaalien jäykkyysmoduulit on esitetty kuvassa 9. Kuvasta voidaan selvästi havaita arvojen asettuvan kuivairtotiheyksien mukaiseen järjestykseen, vaikka suhteet eivät lähtöaineistosta johtuen täysin selkeät olekaan /Kolisoja 1996/. Vesipitoisuuksiltaan ja rakeisuuksiltaan materiaalit poikkesivat melko vähän toisistaan. Vielä selvemmin tiiviystilan vaikutus on havaittavissa kuvasta 10, jossa on esitetty tiiviystilan vaikutus suhteistuneen kalliomurskeen jäykkyysmoduuliin. Tässäkin samalle materiaalille löyhässä ja tiiviissä tilassa mitattujen moduuliarvojen ero on suuruusluokaltaan jopa kaksinkertainen /Kolisoja 1996/.

Tutkiessaan erilaisten hollantilaisia hiekkoja van Niekirk havaitsi, että hiekan tiiviysasteella on merkittävämpi vaikutus pysyvien muodonmuutosten syntymiseen kun sen raekokojakautumalla. Siis huonolaatuinen hiekka hyvin tiivistettynä deformatuu vähemmän kuin parempilaatuinen hiekka huonommin tiivistettynä /van Niekirk 2002/.

Hoff (1999) osoittaa tutkimuksessaan selkeästi sen, että tiiveysaste tai tiivistystyö ja jäykkyys sekä pysyvät muodonmuutokset ovat selkeässä vuoro-suhteessa keskenään. Hyvin tiivistettyyn kerrokseen kehittyä vähemmän pysyviä muodonmuutoksia samalla kuormitustasolla.



Kuva 9. Havaintotiemateriaaleille määritetyt jäykkyysmoduulit; selitteissä näytetunnuksen ohella näytteen huokoisuus n , %, vesipitoisuus w , % ja kuivavirtotiheys p_d , t/m^3 /Kolisoja 1996/.



Kuva 10. Tiivistilän vaikutus suhteistuneen kalliomurskeen jäykkyysmoduuliin /Kolisoja 1996/.

Luotettavasti tutkittua tietoa siitä, miten rakennekerros jälkitiivistyy liikennekuormituksen vaikutuksesta ei ole. Vastaavasti puuttuu tietoa siitä miten iso osa tiivistysvajeesta jälkitiivistyy ja miten paljon rakenne löyhtyy jäätyamisen ja sulamisen seurauksena.

4.3 Poikkileikkauksen mitat ja muoto

Tierakenteessa vaikuttavan jännitystilaan vaikuttavat merkittävästi myös tiepoikkileikkauksen mitat ja muoto. Erityisesti päällysteen kerrospaksuudella voidaan vaikuttaa alla olevan rakenteen jännitystilaan. Lisäksi luiskan läheisyys, sen kaltevuus ja kaistojen leveydet vaikuttavat tierakenteeseen syntyvään pysyvään muodonmuutokseen. Laskelmissa otetaan yleensä huomioon kerrospaksuuksien vaikutus, mutta poikkileikkauksen muodon vaikutusta ei yleensä huomioida. Koetiekonetutkimuksissa on havaittu, että luiskan vaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon, mikäli kuormituksen etäisyys luiskasta on yli 2,5 metriä. Kaistan leveys vaikuttaa kuormitusjakautumaan ja se voidaan ottaa huomioon kuormitusta määritettäessä.

4.4 Lämpötila

Lämpötilan vaikutus sitomattomien kerrosten muodonmuutosominaisuuksiin on jaksottaista. Materiaalien jäykkyys kasvaa, lämpötila laskee alle 0°C asteen. Toisaalta keväällä tapahtuvan sulamisen aikana kerrosten keskimääräinen jäykkyys laskee. Laskun suuruus riippuu materiaalien routaantumisherkyydestä, johon vaikuttaa merkittävästi hienoainespitoisuus. Materiaalin jäykkyys kasvaa uudelleen sulamisjakson jälkeen, kun vesipitoisuus laskee. Käytännössä korkeampiluokkaisilla teillä ei hyväksytä routimisherkkiä materiaaleja rakennekerroksissa. Ongelma koskee lähinnä alempiluokkaisia teitä.

Vaikka itse sitomattomien materiaalien muodonmuutokset eivät riipu lämpötiloista, voivat niiden muodonmuutokset kasvaa lämpimien (yli 30° C) jaksojen aikana, jolloin päällysteen jäykkyysmoduuli alenee ja sitomattomien kerrosten kuormitukset lisääntyvät.

5. Rakeiden fysikaaliset ominaisuudet ja kiviaineksen mineraloginen koostumus

5.1 Raemuoto ja pinnan karkeus

Raemuotoa kuvataan yleensä ns. muotoarvon avulla. Materiaalin muodonmuutoskäyttäytymisen kannalta raemuodolla on merkitystä erityisesti pysyviin muodonmuutosominaisuuksiin erimuotoisten rakeiden toisistaan poikkeavan tiivistettävyyden kautta. Rakeiden puikkoisuus ja liuskeisuus voivat myös kasvattaa rakeiden murtumisesta johtuvaa materiaalin palautumatonta muodonmuutosta erityisesti silloin, kun epäedulliseen raemuotoon yhdistyy alhainen kiviaineksen lujuus. Rakeiden murtopintaisuudella on myös todettu olevan merkittävä vaikutus pysyviin muodonmuutoksiin. Rakeiden pinnan

karkeuden kasvaessa kasvaa myös materiaalin kyky vastustaa pysyviä muodonmuutoksia /Kolisoja 1993/.

Raemuodon ja rakeiden pinnan karkeuden vaikutusta muodonmuutuskäyttäytymiseen ei ole juurikaan tutkittu. Käytännössä hyväksyttävänä pidetyillä materiaaleilla sen vaikutuksen on arveltu olevan niin vähäinen, että sen erottaminen muiden tekijöiden vaikutuksesta on vaikeaa. Huomattavasti merkittävämmän raemuoto vaikuttaa ilmeisesti epäsuorasti materiaalin tiivistyksen kautta, koska raemuodolla on yleensä todettu olevan selvä vaikutus kiviaineksen tiivistyvyyteen / Kolisoja 1996/.

5.2 Rakeiden lujuus ja mineraloginen koostumus

Karkearakeisten materiaalien rakeiden lujuus riippuu ensisijassa rakeissa olevan kiviaineksen lujuudesta. Jääkauden aikana syntyneistä muodostuksista peräisin olevat karkearakeiset materiaalit ovat yleensä lujia ja hyvin kulutusta kestäviä luonnollisesta valikoitumisesta johtuen. Kalliomurskepartikkelien lujuus sen sijaan riippuu kallion kivilajeista ja mahdollisesti tuotantotekniikasta /Kolisoja 1993/.

Suurin merkitys kiviaineksen lujuudella ja kulutuskestävyydellä on pysyviin muodonmuutoksiin. Heikot kivipartikkelit saattavat rikkoutua jopa kokonaan voimakkaissa kuormitusiskuissa, josta aiheutuva rakeiden uudelleen järjestyminen aikaansaa pysyviä muodonmuutoksia. Murskattujen rakeiden terävissä särmissä saattaa tapahtua murenemisen lisäksi toistuvan kuormituksen aiheuttamaa murskaantumista /Kolisoja 1993/.

Kiviaineksen palautuvaan että pysyvään muodonmuutokseen vaikuttavat kiven mineraloginen koostumus ja rakenne. Mineralogia vaikuttaa pysyvään muodonmuutuskäyttäytymiseen jo kuivallakin materiaalilla rakeiden pintakitkan kautta. Kostealla materiaalilla kehittyvän näennäisen koheesion määrää säätelee raekokojakautuman ohella kiviaineksessa olevan hienoaineksen laatu, joka puolestaan riippuu suurelta osin kiven mineralogisesta koostumuksesta /Kolisoja 1993/.

6. Yhteenveto

Useat tekijät vaikuttavat pysyvien muodonmuutosten suuruuteen. Näin monien tekijöiden huomiointi pysyvien muodonmuutosten laskennassa on vaikeaa tai mahdotonta. Siksi niitä joko ei oteta huomioon tai niiden vaikutus arvioidaan välillisesti esimerkiksi materiaalin ominaisuuksissa. Pysyvien muodonmuutosten laskennan kannalta tärkeimmät tekijät ovat:

- rakenne (kerrospaksuudet, materiaalit)
- jännitystila (kuormitusten suuruus ja jakaantuminen)
- kuormituskertojen määrä

- materiaalin tila (kosteus + tiiviys)
- materiaalin ominaisuudet (muutetaan materiaaliparametreiksi)
- olosuhteiden muuttumista ajassa voidaan hallita jakamalla vuosi erikertoisiksi perioideiksi, jolla materiaalien ominaisuudet muuttuvat

Vähemmän tutkittu aihepiiri on alkutiiveyden vaikutus pysyviin muodonmuutoksiin ja tiiveyden muutos rakenteessa uusilla rakenteilla ja rakenteiden käyttöaikana. Selkeä syy tähän on ollut sopivien mittaustekniikoiden puute. Deformaatioprojekti on kuitenkin tuottanut tekniikoita, joita soveltamalla tätäkin asiaa voidaan tutkia.

KIRJALLISUUS

Brown, S. F. 1996. Soil mechanics in pavement engineering. Geotechnique 46 No. 3. s. 383 - 426.

Chan, F.W.K., 1990, Permanent deformation resistance of granular layers in pavements, PhD thesis, Dept. of Civ. Engrg., University of Nottingham, Nottingham, England

COST 337, Current Activity on Unbound Granular Materials Research - Task 4 Working Group, Hill, A. and Dawson, A., Report No. PGR98023, 1998, s. 105

Ekblad, J. (2004). Influence of water on resilient properties of coarse granular materials. Licensiaattityö. KTH, Tukholma 2004. TRITA-VT FR 03:03. ISSN 1650-867X.

Gidel, G., Breyse, D., Horny, P., Chauvin, J-J., Denis, A. (2001). A new approach for investigating the permanent deformation behaviour of unbound granular material using the repeated load triaxial apparatus. Bulletin des laboratoires des Points et Chaussées, 233, Jyly-Augusta 2001. Ref. 4359. Pp 5-21.

Huhtala, H. ja Pihlajamäki, J., 2000, HVS Nordic, The activity of the first period in Finland 1997-1999. Finnra reports 21/2000. Helsinki. 2000. 59 s.

Huurman M. Permanent deformation in concrete block pavement. PhD dissertation. Delft. Netherlands. 1997. 423 p.

Hoff, I. (1999). Material properties of unbound aggregates for pavement structures. Väitöskirja. NTNU Trondheim. 1999. ISBN 82-471-0421-0.

Kolisoja, Pauli, 1997. Resilient deformation characteristics of granular materials. Väitöskirja. TTKK 1997.

Kolisoja, Pauli, 1993. Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet – Kirjallisuus selvitys. Tielaitoksen selvityksiä 39/1993, TIEL 3200163. Helsinki. 147 s.

Kolisoja, P., TPPT –projekti M12; Loppuraportti: Sitomattomien materiaalien moduulit – Vuoden 1995 kokeet. Tielaitoksen selvityksiä 34/1996, TIEL 3200402. Helsinki, 1996. 49 s. + 19 liit.

Korkiala-Tanttu, L., Laaksonen, R. ja Törnqvist, J., 2003. Kevään ja ylikuorman vaikutus ohutpäällysteisen tien vaurioitumiseen, HVS-Nordic- tutkimus, Tiehallinnon selvityksiä 11/2003, Tiehallinto, Helsinki, 2003. 51s. + liitteet

Lekarp, F. 1997. Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials. Licentiate Thesis. Kungliska Tekniska Högskolan. TRITA-IP FR 97-20. 78 s. ISSN 1104-683X

Lekarp, F., 1999. Resilient and permanent deformation behaviour of unbound aggregates under repeated loading. Väitöskirja. KTH, Stockholm 1999.

Tiehallinnon selvityksiä 66/2001. Tien rakennekerrosten materiaalit. Taustatietoa materiaalivalinnoille. Tiehallinto, Helsinki 2001.

van Niekirk, A. A., 2002, Mechanical Behaviour and Performance of Granular Bases and sub-bases in pavements. PhD thesis. Delft University of Technology. 2002. 516 p.

Werkmeister. S, 2004, Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials in Pavement Constructions. PhD dissertation. Technische Universität Dresden, Heft 12.

Yhteenveto deformaatiokokeista

Taulukko. Yhteenveto deformaatiokokeista. Tutkitut materiaalit, kokeiden jännityspolut ja tilasuureet sekä syklimäärä per kuormitusporras.

Materiaali	Vesi- pitoisuus, w (p-%)	Tiiveys- aste, D (%)	Selli- paine, σ_3 (kPa)	Portaita / syklist por- taassa (kpl)	Deviatooriset maksimi- jännitykset, q (kPa) ¹⁾
KaM, Teisko	3.88	97.8	20	5 / $1 \cdot 10^5$	60, 140, 180, 220, 260
	3.62	98.3	45	5 / $1 \cdot 10^5$	135, 315, 405, 495, 585
	3.74	97.8	70	5 / $1 \cdot 10^5$	210, 490, 630, 770, 910
Kam, Voutila	3.67	97.9	20	6+2 / $1 \cdot 10^5$	60, 140, 180, 220, 260, 300, 340, 380
	3.81	97.9	45	6 / $1 \cdot 10^5$	45, 135, 225, 315, 405, 495
	3.79	97.8	70	6 / $1 \cdot 10^5$	210, 350, 490, 630, 770, 910
hkSr, HVS	4.16	97.3	20	4 (5) / $1 \cdot 10^5$	60, 140, 180, 220, (260)
	3.97	97.7	45	4 (5) / $1 \cdot 10^5$	135, 225, 315, 405, (495)
	4.06	97.1	70	3 (5) / $1 \cdot 10^5$	210, 350, 490, (630, xxx) tar- kista template
	3.45	99.9	20	5 / $1 \cdot 10^5$	60, 140, 180, 220, 260
	3.25	100.4	45	6 / $1 \cdot 10^5$	135, 225, 315, 405, 495, 585
	3.24	100.2	70	6 / $1 \cdot 10^5$	210, 350, 490, 630, 770, 910
Hk, HVS	7.97	94.9	20 45 70	6 / $5 \cdot 10^4$	20, 40 / 20 kPa 65, 115 / 45 kPa 160, 240 / 70 kPa
	7.92	99.8	20 45 70	6 / $5 \cdot 10^4$	20, 40 / 20 kPa 65, 115 / 45 kPa 160, 240 / 70 kPa
	7.92	95.0	20	6 / $1 \cdot 10^5$	20, 35, 50, 65, 80, 95
	7.74	94.4	45	6 / $1 \cdot 10^5$	45, 79, 113, 147, 180, 210
	7.82	94.4	70	5 (6) / $1 \cdot 10^5$	70, 123, 176, 229, 240, (280) ²⁾

1) Kaikkien kokeiden q_{min} -tavoite oli 5 kPa. Arvo vaihteli jonkin verran säätöteknisistä syistä.

2) Suluissa oleva tavoitearvo jäi toteutumatta näytteen murtumisen takia – edellisessä portaassa.

LIITTEET

Tutkimus INFRA Deformaatio

Materiaali hieno hiekka (hHk) - HVS

		Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3
Tiheys	g/cm3	1.816	1.804	1.804
Tiiveysaste	%	95.0	94.4	94.4
Vesipitoisuus	%	7.92	7.74	7.82
Halkaisija	mm	101.6	101.6	101.6
Korkeus	mm	200.3	199.7	199.8

Sykli (kpl)	Sig3_ka (kPa)	Sig1_min (kPa)	Sig1_max (kPa)	Sig1/Sig3 (-)	p_max (kPa)	q_max (kPa)	q/p_max (-)	Eps1_plast (%)
100000	20	25.1	39.9	1.997	26.6	19.9	0.748	0.0159
100000	20	25.1	55.1	2.756	31.7	35.1	1.108	0.0590
100000	20	25.1	70.2	3.512	36.7	50.2	1.367	0.1238
100000	20	25.2	85.2	4.262	41.7	65.2	1.563	0.2002
100000	20	25.2	99.9	4.993	46.6	79.9	1.713	0.2891
100000	20	25.2	114.8	5.739	51.6	94.8	1.837	0.4103

Sykli (kpl)	Sig3_ka (kPa)	Sig1_min (kPa)	Sig1_max (kPa)	Sig1/Sig3 (-)	p_max (kPa)	q_max (kPa)	q/p_max (-)	Eps1_plast (%)
100000	45	50.1	90.1	2.002	60.0	45.1	0.751	0.0567
100000	45	54.6	123.8	2.751	71.3	78.8	1.106	0.1441
100000	45	56.8	158.1	3.513	82.7	113.1	1.367	0.2631
100000	45	58.5	191.5	4.256	93.8	146.5	1.561	0.4498
100000	45	60.1	223.9	4.975	104.6	178.9	1.710	1.4193
20000	45	62.4	257.3	5.718	115.8	212.3	1.834	3.2719

Sykli (kpl)	Sig3_ka (kPa)	Sig1_min (kPa)	Sig1_max (kPa)	Sig1/Sig3 (-)	p_max (kPa)	q_max (kPa)	q/p_max (-)	Eps1_plast (%)
100000	70	75.1	140.3	2.004	93.4	70.3	0.752	0.0762
100000	70	79.9	193.4	2.763	111.1	123.4	1.111	0.1930
100000	70	82.2	246.7	3.524	128.9	176.7	1.371	0.3994
100000	70	84.8	299.7	4.281	146.6	229.7	1.567	1.4283
40000	70	87.3	350.3	5.004	163.4	280.3	1.715	2.9525

Tutkimus INFRA Deformaatio

Materiaali hiekkainen sora (hkSr) - HVS

		Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3
Tiheys	g/cm3	2.175	2.184	2.170
Tiiveysaste	%	97.3	97.7	97.1
Vesipitoisuus	%	4.16	3.97	4.06
Halkaisija	mm	151.4	151.3	151.5
Korkeus	mm	301.0	300.2	301.8

Sykli (kpl)	Sig3_ka (kPa)	Sig1_min (kPa)	Sig1_max (kPa)	Sig1/Sig3 (-)	p_max (kPa)	q_max (kPa)	q/p_max (-)	Eps1_plast (%)
100000	20.0	30.8	78.6	2.552	39.5	58.6	1.482	0.0889
100000	20.0	29.7	160.1	5.389	66.7	140.1	2.101	0.3283
100000	20.0	32.5	200.2	6.153	80.1	180.2	2.251	0.9949
9000	20.0	37.5	240.2	6.411	93.4	220.2	2.358	2.4326

Sykli (kpl)	Sig3_ka (kPa)	Sig1_min (kPa)	Sig1_max (kPa)	Sig1/Sig3 (-)	p_max (kPa)	q_max (kPa)	q/p_max (-)	Eps1_plast (%)
100000	45.0	51.4	180.1	3.503	90.0	135.1	1.501	0.0778
100000	45.0	51.5	270.3	5.246	120.1	225.3	1.876	0.3066
100000	45.0	52.3	360.4	6.885	150.1	315.4	2.101	1.9398
3000	45.0	58.2	450.5	7.736	180.2	405.5	2.251	2.7020

Sykli (kpl)	Sig3_ka (kPa)	Sig1_min (kPa)	Sig1_max (kPa)	Sig1/Sig3 (-)	p_max (kPa)	q_max (kPa)	q/p_max (-)	Eps1_plast (%)
100000	70.0	77.1	280.3	3.635	140.1	210.3	1.501	0.1375
100000	70.0	93.0	418.7	4.501	186.2	348.7	1.872	0.6898
30000	70.0	102.2	556.6	5.428	231.6	484.8	2.093	3.3917

LIITTEET

Tutkimus INFRA Deformaatio

Materiaali kalliomurske (KaM) - Teisko

		Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3
Tiheys	g/cm3	2.154	2.163	2.154
Tiiveysaste	%	97.8	98.3	97.8
Vesipitoisuus	%	3.88	3.62	3.74
Halkaisija	mm	151.4	151	151.4
Korkeus	mm	300.1	300.0	300.3

Sykli (kpl)	Sig3_ka (kPa)	Sig1_min (kPa)	Sig1_max (kPa)	Sig1/Sig3 (-)	p_max (kPa)	q_max (kPa)	q/p_max (-)	Eps1_plast (%)
100000	20.0	25.6	80.1	3.122	40.0	60.1	1.501	0.0487
100000	20.0	27.6	160.2	5.800	66.7	140.2	2.101	0.1497
100000	20.0	29.4	200.2	6.819	80.1	180.2	2.251	0.1981
100000	20.0	31.3	241.5	7.716	93.8	221.5	2.361	0.2600
100000	20.0	33.0	280.3	8.501	106.8	260.3	2.438	0.3239

Sykli (kpl)	Sig3_ka (kPa)	Sig1_min (kPa)	Sig1_max (kPa)	Sig1/Sig3 (-)	p_max (kPa)	q_max (kPa)	q/p_max (-)	Eps1_plast (%)
100000	45.0	51.4	180.2	3.505	90.1	135.2	1.501	0.0563
100000	45.0	51.6	360.4	6.990	150.1	315.4	2.101	0.2496
100000	45.0	51.8	450.5	8.704	180.2	405.5	2.251	0.4551
100000	45.0	54.9	543.5	9.896	211.2	498.5	2.361	0.8410
100000	45.0	58.7	630.7	10.748	240.2	585.7	2.438	1.5920

Sykli (kpl)	Sig3_ka (kPa)	Sig1_min (kPa)	Sig1_max (kPa)	Sig1/Sig3 (-)	p_max (kPa)	q_max (kPa)	q/p_max (-)	Eps1_plast (%)
100000	70.0	77.1	282.1	3.660	140.7	212.1	1.508	0.0877
100000	70.0	96.4	559.2	5.801	233.1	489.2	2.099	0.5142
100000	70.0	99.3	698.7	7.038	279.6	628.7	2.249	0.9580
100000	70.0	103.3	842.5	8.153	327.5	772.5	2.359	1.7515
30000	70.0	106.8	978.0	9.157	372.7	908.0	2.436	2.3580

Tutkimus INFRA Deformaatio

Materiaali kalliomurske (KaM) - Voutila

		Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3
Tiheys	g/cm3	2.188	2.189	2.187
Tiiveysaste	%	97.9	97.9	97.8
Vesipitoisuus	%	3.67	3.81	3.79
Halkaisija	mm	151.1	151.2	151.3
Korkeus	mm	301.3	300.3	300.3

Sykli (kpl)	Sig3_ka (kPa)	Sig1_min (kPa)	Sig1_max (kPa)	Sig1/Sig3 (-)	p_max (kPa)	q_max (kPa)	q/p_max (-)	Eps1_plast (%)
100000	20.0	25.6	79.7	3.110	39.9	59.7	1.496	0.0384
100000	20.0	28.3	159.8	5.654	66.6	139.8	2.099	0.1337
100000	20.0	30.5	199.8	6.560	79.9	179.8	2.249	0.1874
100000	20.0	32.5	239.7	7.384	93.2	219.7	2.356	0.2528
100000	20.0	34.1	279.6	8.191	106.5	259.6	2.437	0.3286
100000	20.0	36.1	318.7	8.837	119.6	298.7	2.498	0.4400
100000	20.0	25.9	359.4	13.861	133.1	339.4	2.549	0.6577
100000	20.0	38.7	398.3	10.305	146.1	378.3	2.589	0.9140

Sykli (kpl)	Sig3_ka (kPa)	Sig1_min (kPa)	Sig1_max (kPa)	Sig1/Sig3 (-)	p_max (kPa)	q_max (kPa)	q/p_max (-)	Eps1_plast (%)
100000	45.0	51.3	90.1	1.756	60.0	45.1	0.751	0.0062
100000	45.0	51.4	180.2	3.506	90.1	135.2	1.501	0.0564
100000	45.0	51.5	270.3	5.249	120.1	225.3	1.876	0.1121
100000	45.0	51.9	363.3	7.005	151.1	318.3	2.106	0.1907
100000	45.0	51.7	450.5	8.721	180.2	405.5	2.251	0.3027
100000	45.0	72.3	539.7	7.462	209.9	494.7	2.357	0.4759

Sykli (kpl)	Sig3_ka (kPa)	Sig1_min (kPa)	Sig1_max (kPa)	Sig1/Sig3 (-)	p_max (kPa)	q_max (kPa)	q/p_max (-)	Eps1_plast (%)
100000	70.0	77.1	280.3	3.636	140.1	210.3	1.501	0.1194
100000	70.0	90.1	419.3	4.655	186.4	349.3	1.874	0.2416
100000	70.0	94.7	559.6	5.907	233.2	489.6	2.100	0.4732
100000	70.0	98.8	703.5	7.118	281.2	633.5	2.253	0.9146
100000	70.0	102.3	838.6	8.197	326.2	768.6	2.356	1.7838
100000	70.0	106.8	977.8	9.154	372.6	907.8	2.436	3.0490

Tilaaaja:		L.K-T.					
Tutkimus:		HVS / Kevätylikuormat					
Näytteen tunnus:		Hk					
- laboratorionumero							
- piste, paalu							
- syvyys		pohjamaa 14 % vettä tuli läpi					
Näytteen massa	g	2900	2900	2900	2900	2900	
Haluttu vesipitoisuus	%	8	10	12	13	14	
Lisättävä vesimäärä	g	232	290	348	377	406	
Kostea näytteen ja muotin massa	g	6286	6346	6370	6350	6330	
Muotin massa	g	4378	4378	4378	4378	4378	
Märän näytteen massa	g	1908	1968	1992	1972	1952	
Astian massa	g	480	466	464	463	455	
Märän näytteen ja astian massa	g	2386	2428	2450	2425	2398	
Kuivan näytteen ja astian massa	g	2247	2252	2263	2229	2189	
Veden massa	g	139	176	187	196	209	
Märän näytteen massa	g	1906	1962	1986	1962	1943	
Kuivan näytteen massa	g	1767	1786	1799	1766	1734	
Vesipitoisuus märkäpainosta	%	7.29	8.97	9.42	9.99	10.76	
Water content of dry weight %	%	7.87	9.85	10.39	11.10	12.05	
Märkäirttiheys	g/cm ³	2.025	2.084	2.110	2.084	2.064	
Märkätilavuuspaino	kN/m ³	19.86	20.44	20.69	20.44	20.24	
Kuivairtiheys	g/cm ³	1.877	1.897	1.911	1.876	1.842	
Kuivatilavuuspaino	kN/m ³	18.41	18.61	18.74	18.40	18.07	

Parannettu Proctor -koe ☒ X
Normaali Proctor -koe ☐

Proctor -muotin tilavuus:
V = 941.3 cm³

Poistettujen rakeiden määrä paino -%:na
koko seulotun aineksen määrästä:
k = 0 %

Poistettujen rakeiden kiinttiheys:
p_s = 2.65 g/cm³

Proctor -kokeesta saatu korjaamaton
kuivairtiheyden maksimiarvo:
p_{dmax} = 1.911 g/cm³

Korjattu maksimikuivatilavuuspaino:
p_{dmaxkorj} = 1.911 g/cm³
γ_{dmaxkorj} = 18.74 kN/m³

Optimivesipitoisuus:
w_{opt} = 10.39 %

Korjattu optimivesipitoisuus:
w_{opt.korj.} = 10.39 %

pvm
Hannu Jukka
Tutki

Water content of dry weight (%)	Dry bulk density (gd kN/m ³)
7.87	18.41
9.85	18.61
10.39	18.74
11.10	18.40
12.05	18.07

Tilaaaja:	R Laaksonen					
Tutkimus:	Infra Deformaatio					
Näytteen tunnus:	Sr					
- laboratorionumero						
- piste, paalu	HVS, hiekkainen sora					
- syvyys						

Näytteen massa	g	6000	6000	6000	6000		
Haluttu vesipitoisuus	%	5.5	6.5	7.5	8.5		
Lisättävä vesimäärä	g	330	390	450	510	0	0
Kostea näytteen ja muotin massa	g	10894	11075	11040	11015		
Muotin massa	g	6039	6039	6039	6039		
Märän näytteen massa	g	4855	5036	5001	4976		
Astian massa	g	1042	988	1003	982		
Märän näytteen ja astian massa	g	5893	6007	5988	5932		
Kuivan näytteen ja astian massa	g	5640	5721	5672	5606		
Veden massa	g	253	286	316	326		
Märän näytteen massa	g	4851	5019	4985	4950		
Kuivan näytteen massa	g	4598	4733	4669	4624		
Vesipitoisuus märkäpainosta	%	5.22	5.70	6.34	6.59		
Vesipitoisuus kuivapainosta	%	5.50	6.04	6.77	7.05		
Märkäirttiheys	g/cm ³	2.291	2.370	2.354	2.338		
Märkätilavuuspaino	kN/m ³	22.47	23.25	23.09	22.93		
Kuivairtiheys	g/cm ³	2.172	2.235	2.205	2.184		
Kuivatilavuuspaino	kN/m ³	21.30	21.92	21.62	21.42		

Paramettu Proctor -koe ☒ X
 Normaali Proctor -koe ☐

Proctor -muotin tilavuus: V = 2117.4 cm³

Poistettujen rakeiden määrä paino -%:na koko seulotun aineksen määrästä: k = 0 %

Poistettujen rakeiden kiintotiheys: p_s = 2.65 g/cm³

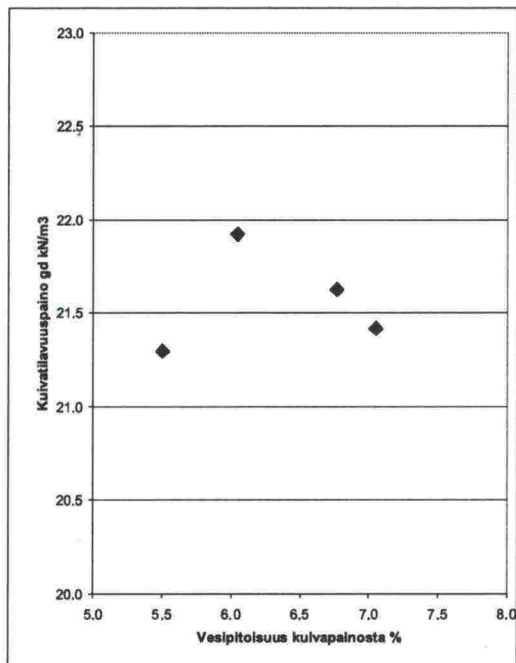
Proctor -kokeesta saatu korjaamaton kuivairtiheyden maksimiarvo: p_{dmax} = 2.235 g/cm³

Korjattu maksimikuivatilavuuspaino: p_{dmaxkorj} = 2.235 g/cm³
γ_{dmaxkorj} = 21.92 kN/m³

Optimivesipitoisuus: w_{opt} = 6.04 %

Korjattu optimivesipitoisuus: w_{opt, korj.} = 6.04 %

23.4.2004
pvm
H.Jukka
Tutki



LIITTEET

Tilaaaja:	R Laaksonen					
Tutkimus:	KaM Teisko 2004 Ø32 mm					
Näytteen tunnus:	KK 0/31					
- laboratorionumero	03/04					
- piste, paalu						
- syvyys						

Näytteen massa	g	5500	5500	5500	5500	5500	5500
Haluttu vesipitoisuus	%	2	4	6	7	8	10
Lisättävä vesimäärä	g	110	220	330	385	440	550
Kostea näytteen ja muotin massa	g	10659	10800	10951	10990	11060	11052
Muotin massa	g	6039	6039	6039	6039	6039	6039
Märän näytteen massa	g	4620	4761	4912	4951	5021	5013
Astian massa	g	1042	982	988	988	982	982
Märän näytteen ja astian massa	g	5659	5735	5877	5917	5979	5976
Kuivan näytteen ja astian massa	g	5569	5553	5620	5606	5641	5626
Veden massa	g	90	182	257	311	338	350
Märän näytteen massa	g	4617	4753	4889	4929	4997	4994
Kuivan näytteen massa	g	4527	4571	4632	4618	4659	4644
Vesipitoisuus märkäpainosta	%	1.95	3.83	5.26	6.31	6.76	7.01
Vesipitoisuus kuivapainosta	%	1.99	3.98	5.55	6.73	7.25	7.54
Märkäirtotiheys	g/cm ³	2.181	2.245	2.309	2.328	2.360	2.359
Märkätilavuuspaino	kN/m ³	21.38	22.01	22.64	22.83	23.14	23.13
Kuivairtotiheys	g/cm ³	2.138	2.159	2.188	2.181	2.200	2.193
Kuivatilavuuspaino	kN/m ³	20.97	21.17	21.45	21.39	21.58	21.51

Parannettu Proctor -koe ☒ X
Normaali Proctor -koe ☐

Proctor -muotin tilavuus:
V = 2117.4 cm³

Poistettujen rakeiden määrä paino -%:na
koko seulotun aineksen määrästä:
k = 0 %

Poistettujen rakeiden kiintotiheys:
ρ_s = 2.65 g/cm³

Proctor -kokeesta saatu korjaamaton
kuivairtitiheyden maksimi-arvo:
ρ_{dmax} = 2.200 g/cm³

Korjattu maksimikuivatilavuuspaino:
ρ_{dmaxkorj} = 2.200 g/cm³
γ_{dmaxkorj} = 21.58 kN/m³

Optimivesipitoisuus:
w_{opt} = 7.25 %

Korjattu optimivesipitoisuus:
w_{opt, korj} = 7.25 %

6.2.2004
pvm
H.Jukka
Tutki

Vesipitoisuus kuivapainosta (%)	Kuivatilavuuspaino g/dm³
2.0	21.0
4.0	21.2
5.5	21.5
6.5	21.4
7.25	21.6
7.5	21.6
8.0	21.5

Tilaaja:	R Laaksonen					
Tutkimus:	INFRA Deformaatio					
Näytteen tunnus:	KaM 0/32 mm					
- laboratorionumero						
- piste, paalu	Voutila					
- syvyys						

Näytteen massa	g	5500	5500	5500			
Haluttu vesipitoisuus	%	6	8	10			
Lisättävä vesimäärä	g	330	440	550			
Kostea näytteen ja muotin massa	g	10957	11022	11091			
Muotin massa	g	6039	6039	6039			
Märän näytteen massa	g	4918	4983	5052			
Astian massa	g	982	988	1003			
Märän näytteen ja astian massa	g	5882	5958	6038			
Kuivan näytteen ja astian massa	g	5625	5649	5737			
Veden massa	g	257	309	301			
Märän näytteen massa	g	4900	4970	5035			
Kuivan näytteen massa	g	4643	4661	4734			
Vesipitoisuus märkäpainosta	%	5.24	6.22	5.98			
Vesipitoisuus kuivapainosta	%	5.54	6.63	6.36			
Märkäirttiheys	g/cm ³	2.314	2.347	2.378			
Märkätilavuuspaino	kN/m ³	22.69	23.02	23.32			
Kuivairtiheys	g/cm ³	2.193	2.201	2.236			
Kuivatilavuuspaino	kN/m ³	21.50	21.59	21.93			

Parannettu Proctor -koe ☒ X
Normaali Proctor -koe ☐

Proctor -muotin tilavuus: $V = 2117.4 \text{ cm}^3$

Poistettujen rakeiden määrä paino-%:na
koko seuloen aineksen määrästä:
 $k = 0 \%$

Poistettujen rakeiden kiintotiheys:
 $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$

Proctor -kokeesta saatu korjaamaton
kuivairtiheyden maksimiarvo:
 $P_{dmax} = 2.236 \text{ g/cm}^3$

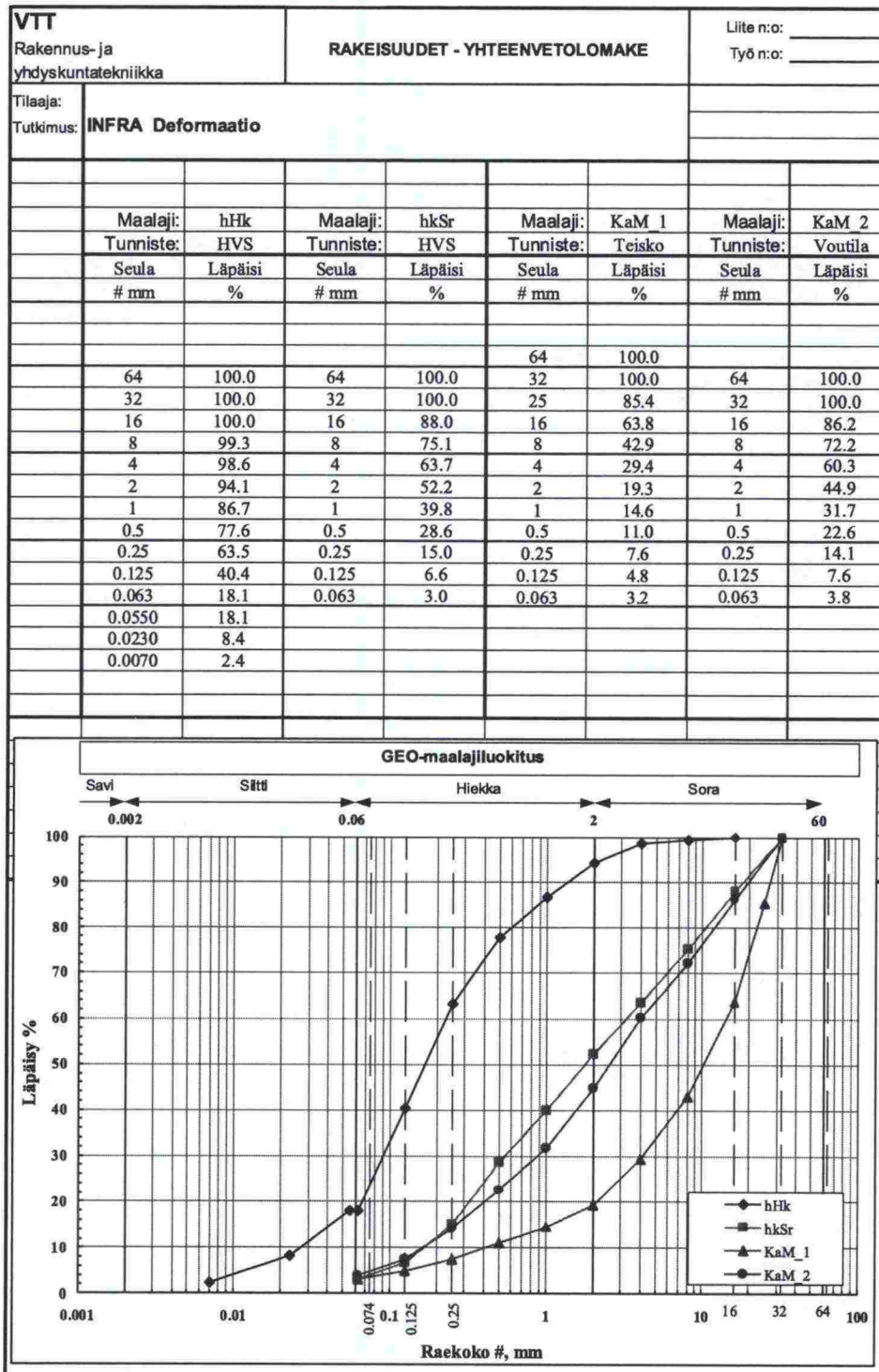
Korjattu maksimikuivatilavuuspaino:
 $P_{dmaxkorj} = 2.236 \text{ g/cm}^3$
 $\gamma_{dmaxkorj} = 21.93 \text{ kN/m}^3$

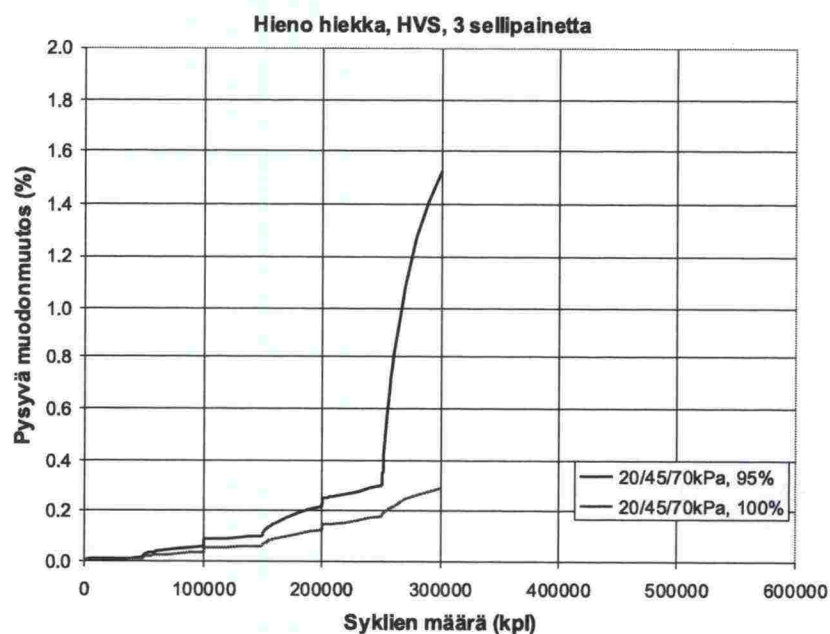
Optimivesipitoisuus:
 $w_{opt} = 6.36 \%$

Korjattu optimivesipitoisuus:
 $w_{optkorj} = 6.36 \%$

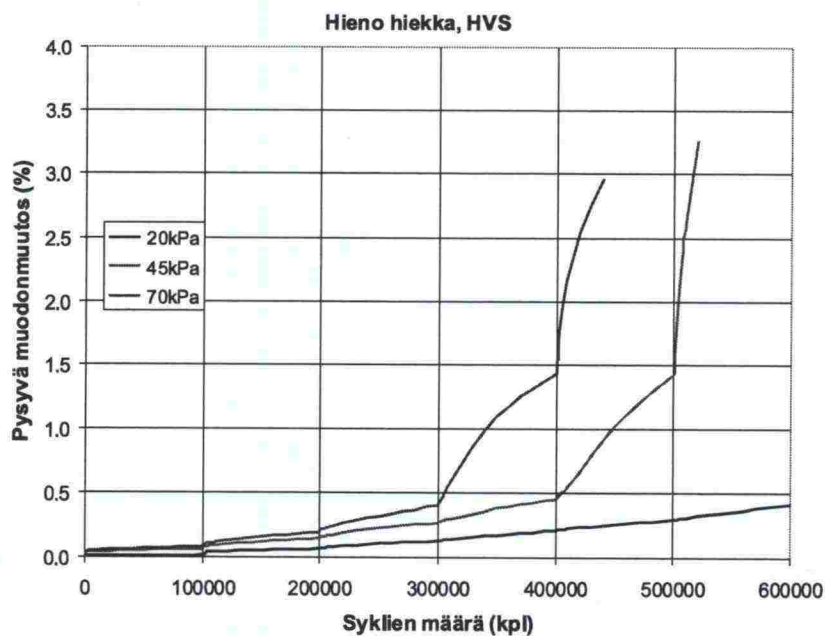
19.3.2004
pvm
H.Jukka
Tutki

Vesipitoisuus kuivapainosta %	Kuivatilavuuspaino g/d kN/m³
5.24	21.50
6.22	21.59
5.98	21.93

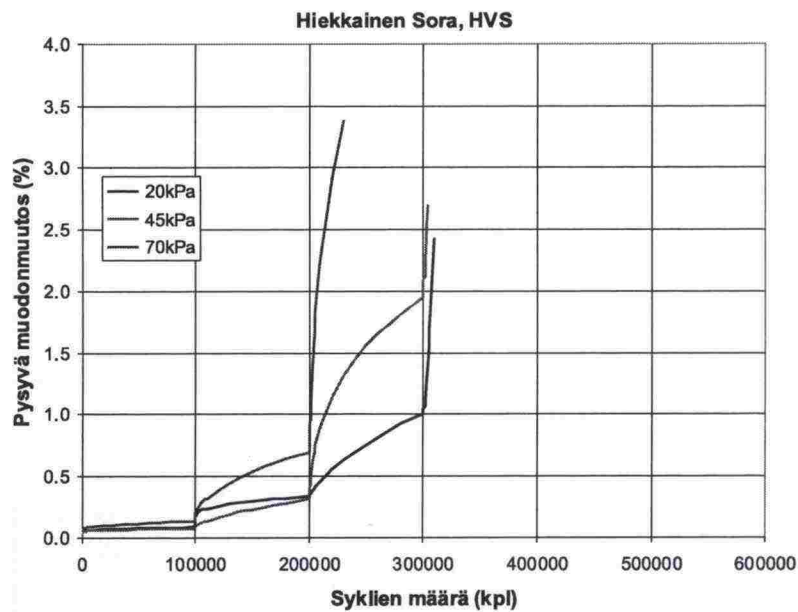




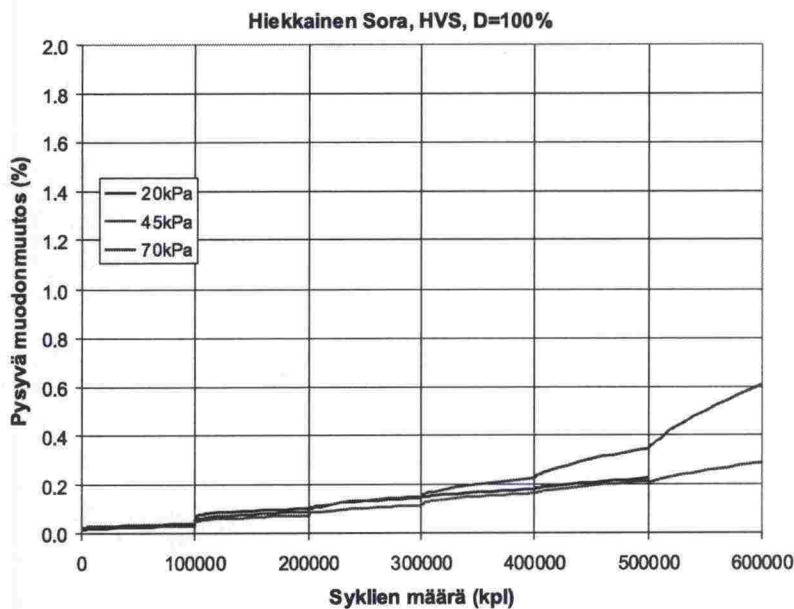
Syklinen kolmiakselikoe. Hieno hiekka (HVS). Alkutiiveysaste 95 % ja 100 %. Vesipitoisuus 8 %. Kokeen aikana kolme sellipainetta: 20, 45 ja 70 kPa. Kaksi kuormitustasoa per sellipaine.



Syklinen kolmiakselikoe. Hieno hiekka (HVS). Alkutiiveysaste 95 %. Vesipitoisuus 8 %. Kullakin näytteellä vakio sellipaine: 20 tai 45 tai 70 kPa. Kuusi kuormitustasoa per sellipaine (tavoite).

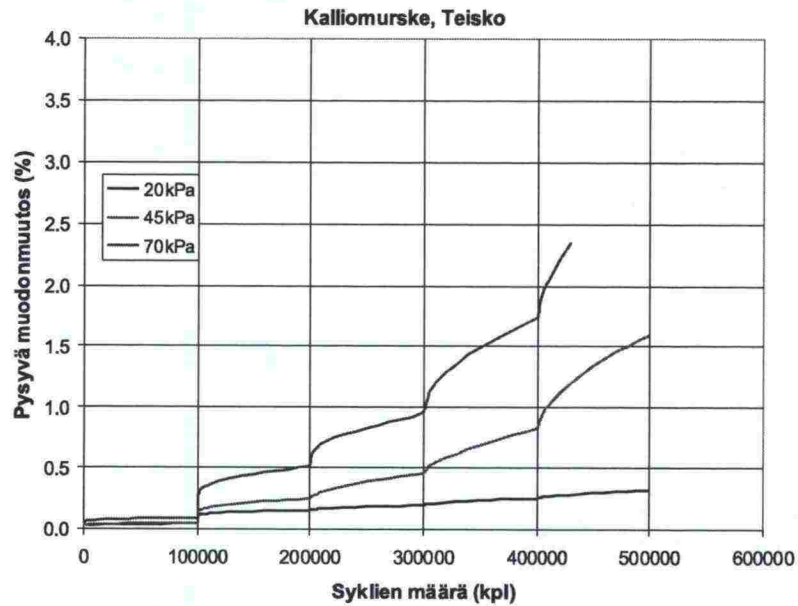


Syklinen kolmiakselikoe. Hiekkainen sora (HVS). Alkutiiveysaste 95 %. Vesipitoisuus 4 %. Kullakin näytteellä vakio sellipaine: 20 tai 45 tai 70 kPa. Viisi - kuusi kuormitustasoa per sellipaine (tavoite).

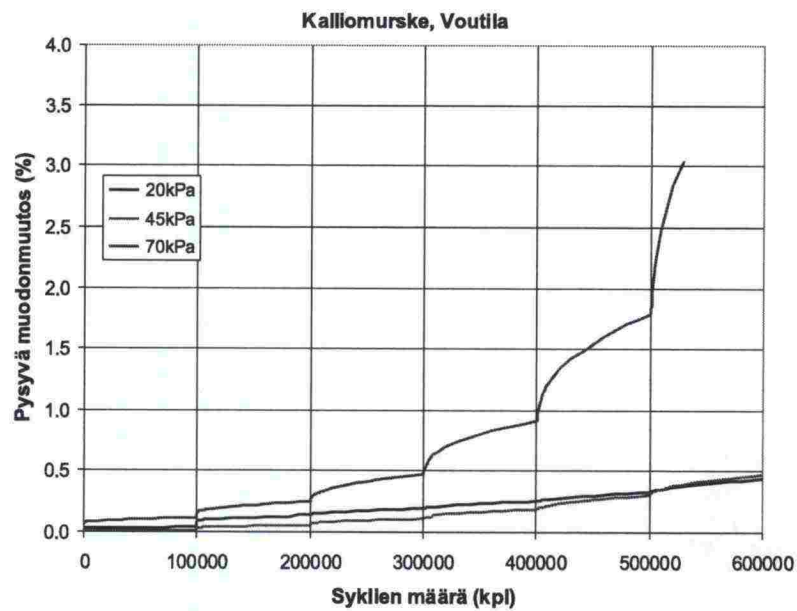


Syklinen kolmiakselikoe. Hiekkainen sora (HVS). Alkutiiveysaste 100 %. Vesipitoisuus 3.5 %. Kullakin näytteellä vakio sellipaine: 20 tai 45 tai 70 kPa. Viisi - kuusi kuormitustasoa per sellipaine (tavoite).

LIITTEET



Syklinen kolmiakselikoe. Kalliomurske (Teisko). Alkutiiveysaste 97 %. Vesi-pitoisuus 4 %. Kullakin näytteellä vakio sellipaine: 20 tai 45 tai 70 kPa. Viisi -kuusi kuormitustasoa per sellipaine (tavoite).



Syklinen kolmiakselikoe. Kalliomurske (Voutila). Alkutiiveysaste 97 %. Vesi-pitoisuus 4 %. Kullakin näytteellä vakio sellipaine: 20 tai 45 tai 70 kPa. Viisi -kuusi kuormitustasoa per sellipaine (tavoite).

VASTELASKENNAN (STRESS-LASKENNAN) EROT APAS_3:N JA DEFORMAATIO-TYÖKALUN VÄLILLÄ

Liikennekuorman rakenteeseen synnyttämät vasteet lasketaan APAS_3 -mitoitushjelmassa ja deformaatiotyökalussa samalla Nynas N.V. kehittämällä laskentamoduulilla (STRESS).

Kummassakin ohjelmassa rakenne ja kuormitus mallinnetaan STRESS-moduulille täsmälleen samoilla parametreillä. Siten myös samalla tavoin määriteltä rakenne ja kuormitus (samat laskentaparametrit) antavat molemmilla ohjelmilla samat vasteet. Hyvin pieniä eroja (<1 %) voi esiintyä eri käyttöjärjestelmien kesken ja siksi, että APAS_3 on toteutettu 16-bitin ohjelmointitekniikalla ja deformaatiotyökalu 32-bittisenä.

APAS_3:ssa vastelaskenta on hyvin näkyvä toiminto vaikkakin keskeisin on tietenkin mitoitus (rakenteen paksuuden määrittely). Ohjelmassa on mm. toiminto jolla lasketaan pelkästään vasteet ja tuloksia voi tarkastella rakenteen eri kohdissa. Käyttäjä voi myös ohjata vastelaskentaa melko monipuolisesti esim. asettamalla haluamansa kuormituksen.

Deformaation laskentatyökalussa STRESS -ohjelmaa käytetään taustalla, eikä ohjelman laskemia vasteita hyödynnetä (ei edes näytetä) mitenkään muuten kuin deformaation arvioinnissa. Sen sijaan käyttäjällä on deformaatio-sovelluksessa huomattavasti enemmän mahdollisuuksia säätää rakenteessa vallitsevia olo-suhteita.

Merkittävin lisäominaisuus deformaatiotyökalussa on periodijaottelu. Se mahdollistaa erilaisten lämpötilojen ja kosteuspitoisuuksien käytön melko hyvin todellisuutta vastaavasti esim. vuodenaikaisten vaihtelujen mukaan. Nämä asetetaan ohjelmalle periodikohtaisesti ja ne otetaan huomioon mm. jäykkyysmoduuli. Samalla työkaluun lisättiin piirre, joka ottaa huomioon materiaalin jäykkyysmoduulin määrittelyn

- kosteustilan suhteen
- rakentamisesta kuluneen ajan (län/kuormitusten lukumäärän) suhteen
- kuormitusten aiheuttaman tiivistymisen seurauksena.

Sekä APAS_3 -ohjelmassa että työkalussa moduuli on määriteltävissä myös lämpötilan ja kuormitusnopeuden funktiona. Työkalulla voidaan lisäksi tarkastella seuraavia rakenteen, materiaalien ja olosuhteiden erityispiirteitä:

- uuden päällystekerroksen lisääminen rakenteeseen tarkastelujakson aikana (vaiheittain rakentaminen)
- rakennekerrosten tiivistämisen (alkutiiviyden) vaikutus deformatumiseen
- rakennekerrosten vesipitoisuuden vaikutus deformatumiseen
- kuormitusten hajonnan vaihtelu poikkisuunnassa (leveys ja hajontamalli)
- luiskun vaikutus deformaatioon (HVS-kokeisiin perustuvalla kertomella).

LIITE 9. Laskentatyökalun todentaminen

Deformaation laskentatyökalun toiminnan verifioiminen

Tavoite

Deformaation laskentatyökalun toiminnan verifioiminen (varmentaminen) deformaation määrän ennustustarkkuuden ja deformaationopeuden ennustustarkkuuden suhteen. Tämä toteutetaan seuraamalla useita instrumentoituja tiekohteita useamman (3 – 5) vuoden ajan.

Todentamismittauksilla pyritään kussakin kohteessa määrittämään rakennekerroskohtaiset deformaatiot. Pinnan monitorointitulos on kaikkien mitattujen rakennekerros materiaalien deformaatio (ajan) kuormituskertojen funktiona kyseisessä kohteessa. Yhdestä todentamiskohteesta saadaan siis yksi - N todentamispistettä per mittauskerta laskentatyökalun ennusteen todentamiseen. Mitä enemmän kerroksia mitataan ja mitä useammin se tapahtuu, sitä parempi on todentamistarkkuus ja sitä enemmän laskentatyökalu kehittyy.

Menetelmä

Kohteiden deformatumista seurataan vähintään kaksi kertaa vuodessa 2 - 5 vuoden ajan. Deformaatio mitataan pinnalta ja tarpeellisessa määrin rakenteesta. Vähimmäisrakennekerrokset ovat kaikki sidotut rakennekerrokset ja sitomaton kantava kerros. Rakennekerros materiaaleille tehdään tarvittaessa erilaisia laboratoriokokeita niiden suhteellisten deformaatio-ominaisuuksien määrittämiseksi. Mittausaikataulu suunnitellaan siten, että mittauksista voidaan erottaa kuluman vaikutus ja että ajoitus palvelee myös deformaatiotyökalun nopeusennusteen todentamista.

Pudotuspainolaite (PPL) –mittaus – miksi tarvitaan ? Koska deformaation määrä ja nopeus riippuvat oleellisesti materiaali-kohtaisista jännityksistä on tarpeen tietää kerroskohtaiset jäykkyydet. Laskentaan ne saadaan joko APAS –tietokannasta tai takaisinlasketuista PPL –tuloksista. Jälkimmäinen menettely (epätarkkuuksineenkin) varmistaa reaalisten arvojen käytön työkalun kehittämisessä. PPL –mittauksen ajankohta tulee tosin miettiä mahdollisimman edustavaksi. Mahdollisuuksien mukaan tulisi mitata rakenne kosteana, koska kerroskohtaiset jännitykset ja deformaatio kasvavat alhaisen jäykkyyden kausina.

Todentamismenettelyn lähtötiedot

Instrumentointi (Instrumentit, sijoitus, määrät ja saanti)

- Minimi-instrumentointi (päälystettävät hyvin tunnetut kohteet): Mitataan pinnan urautuminen ja päälysteen deformaatio. Rakenteen deformaatio jaetaan työkalun ennusteen mukaan eri kerroksille tai kantavaa painotuen. Instrumentointia tarvitaan päälysteen deformaation mittaukseen: pyörrevirtausmenetelmän vaatima alumiinikalvo/-levy tai muu sähköä

johtava materiaali. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää TKK:n menetelmää (pinnan ja päällysteen alle asennetun teräslevyn välimatkan mittausta).

- Keskimääräinen instrumentointi (rakenteen parantaminen): Mitataan pinnan urautuminen, päällysteen deformaatio ja kantavan kerroksen deformaatio. Tällöin tulee mukaan yksi instrumentointipaikka lisää. Kantavan (sidottu) paksuuden (100-150 mm) mukaan voidaan valita pyörre-virtamittauksen vaatima sähköäjohtava materiaalilevy tai letku-painumamittauksen edellyttämän letkun asennus. Kantavan kerroksen instrumentoinnilla saadaan tietoa päällysteen ja kantavan deformaatiosta ja loppu deformaatio jaetaan alemmille kerroksille tarpeen mukaan.
- Täydellinen instrumentointi (uudet tiet): Kuten yllä, mutta painumaletkut asennetaan jokaiseen kerrosrajaan. Tämä menettely takaa deformaation jakamisen oikein eri rakennekerroksille. Sovelletaan jos halutaan varmistaa urakoitsijoiden väliset vastujaot tai esimerkiksi urakoitsijan omassa laadunvalvonnassa.
- Tutkimushanke instrumentointi (tutkimushankkeiden uudet tiet): Kuten yllä, mutta päällysteen ja kantavan alle asennetaan maanpaineanturit todellisen jännitystilan ja Emu-coil -mittauskelat todellisen palautuvan muodonmuutoksen mittaamiseksi. Näillä instrumenteilla voidaan luotettavammin varmistaa rakennekerrosten jäykkyys.

Instrumentointi tulee tehdä vähintään kolmessa poikkileikkauksessa, jotta saadaan edes suuntaa-antava käsitys tulosten hajonnasta ja myös menetelmän tarkkuudesta ja epävarmuuksista.

Instrumentoinnin voi ohjeiden mukaan tehdä urakoitsija tai urakoitsijan konsultti / tutkimuslaitos. Myös mittaukset voi tehdä jokainen asiaan perehtynyt, mittalaitteet omistava organisaatio.

Mittaukset ja monitorointi

Välttämättömiä mittauksia ovat:

- Minimi-instrumentointi:
 - PTM-auto/Profilometrimittaukset vähintään kaksi kertaa vuodessa (vähintään kolmena vuotena, jos seuranta tehdään viisi vuotta)
 - Pyörrevirtamittaukset samoina ajankohtina
- Keskimääräinen instrumentointi
 - PTM-auto/Profilometrimittaukset vähintään kaksi kertaa vuodessa (vähintään kolmena vuotena, jos seuranta tehdään viisi vuotta)
 - Pyörrevirtamittaukset samoina ajankohtina
 - Painumaletkumittaukset (alussa ja lopussa)
- Täydellinen instrumentointi
 - Kuten yllä
- Tutkimushankeinstrumentointi
 - Kuten yllä, mutta lisäksi maanpaine- ja Emu-coil -anturien mittaukset (vähintään kolme kertaa seurannan aikana)

LIIETTEET

- Välttämättömiä mittauksia ovat myös rakennusaikaiset rakenteiden kerrospaksuus-määritykset, tiheys- tai tiiveysaste -määritykset.
- Tarpeellisia lisämittauksia ovat aiemmin mainitut: PPL -mittaukset, rakenteiden paksuusmittaukset, kosteusmittaukset, vaurioinventointi, kohteiden vaaitukset.

Tulostus

Mittauksista tulostetaan kokonaisura, kuluma, kokonaisdeformaatio – deformaatio päällysteessä ja rakennekerroksessa(kerroksissa).

Lisäksi tulostetaan kaikki muut mittaukset ja niiden avulla määriteltyt kohde-/rakennekohtaiset deformaatioestimaatit sekä rakennekohtaiset jäykkyydet.

Kohteen rakennekerrosten materiaaliominaisuudet ja laboratoriokokeetTiedon tarve:

Työkalun toiminnan todentamiseen tarvitaan tiedot rakennekerrospaksuuksista (suunnitelmat ja toteutuneet), materiaaliominaisuuksista (tyyppi, rakeisuus), tiiveysaste- ja kosteus.

Lisäksi tarvitaan tieto materiaalin rakennejäykkyydestä (APAS tai PPL-tuloksista takaisinlaskettu). Uusista tai poikkeavista materiaaleista tarvitaan enemmän tietoa kuin esim. APAS:iin syötetyistä materiaaleista.

- Mitä kokeita on tehtävä, mistä kerroksista ja materiaaleista, kenen toimesta ja missä
- Tehtävät kokeet määräytyvät instrumentoinnin laajuuden mukaan.
- Minimi-instrumentointi
 - Jos tavoitteena on mitata vain sidotun päällysteen deformaatiota, niin tutkimukset voidaan keskittää päällystemateriaaliin. Tällöin tutkittavaksi ehdotettavia asioita ovat: syklinen creep ja wheel tracking, sekä tyypilliset indeksikokeet (rakeisuus, tyhjätila, sideainepitoisuus, bitumin kovuus).
- Keskimääräinen instrumentointi
 - Tässä tapauksessa on päällysteen (esitetty edellä) lisäksi määritettävä myös kantavan kerroksen ominaisuudet (indeksi- ja toimivuus). Indeksiominaisuudet kattavat rakeisuuden, minerologisen määrityksen, syntyvän (sora, soramurske, kalliomurske), Soil suction -määrityksen sekä ICT -tiivistyvyysmäärityksen. Toimivuusominaisuutena voidaan määrittää materiaalin jäykkyys- ja deformaatioominaisuudet (syklinen kolmiakselikoe).
- Täydellinen instrumentointi
 - Kuten yllä, mutta tarpeen mukaan myös muiden kerrosten ominaisuudet määritetään - vähintään rakeisuus, minerologia ja syntyta,pa,

Todentamisen toteutus kentällä ja kustannusjakoInstrumentoinnin toteutus ja seuranta

Instrumentointi voidaan toteuttaa raporttia "Deformaation mittausmenetelmät" soveltaen. Instrumentoinnin voi tehdä urakoitsija tai urakoitsijan konsultti tai tutkimuslaitos. Rakenteeseen asennettavat levyt ja letkut ovat kaupallisia tuotteita ja kaikkien saatavilla. Mittauslaitteet ovat yksittäiskappaleita ja niitä on tällä hetkellä rajoitetusti saatavilla. Pyörrevirtamittareita on Suomessa ilmeisesti useampia, mutta letkupainumamittauskalustoja vain yksi (VTT). Pyörrevirtamittauslaitteistot ovat urakoitsijoiden hankittavissa ja hallittavissa, mutta letku-painumamittauslaite edellyttää laitteiden tuntemusta ja erityistä huolellisuutta sekä mittauksen aikana että tulosten tulkinnoissa, eli se ei ole rutiinimittauslaite.

Kustannusjako

Seurantaprojektin aikana järkevä kustannusjako voisi olla sellainen, että tilaaja (tiepiirit) maksavat vähintään alkumittaukset ja alustavat materiaalitutkimukset (olemassaolevan rakenteen osalta) sekä osan instrumentoinnista ja lisämittauksista johtuvista kuluista, urakoitsija maksaa loput ja VTT voisi osallistua rahoituksen sallimassa määrin yksittäisiin mittauksiin ja tulosten käsittelyyn sekä työkalun toiminnan hiomiseen.

Mallin verifiointi

Mallin toimintaa verrataan todentamiskohteista saataviin toteutuma- ja materiaalitietoihin. Tärkeintä on varmistaa, että työkalun lyhyen aikavälin (takuuajan) ennuste on riittävän tarkka sekä deformaatiouran että sen muodostumisnopeuden osalta.

Raportointi

Todentamistyöstä tehdään ohjeiden lisäksi kohdekohtaiset selvitysraportit sekä niiden pohjalta yhteenveto projektin loppuessa. Samassa raportissa voidaan raportoida myös työkaluun tehdyt muutokset seurantajakson aikana sekä työkalun epätarkkuusarvio.



ISSN 1459-1553
ISBN 951-803-392-7
TIEH 3200907-v